

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет машиностроения  
Кафедра «Мехатроника и автоматизация»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ В.Р. Гасияров

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА  
ЮУрГУ 15.04.06.2020.240 ПЗ (ВКР)

Модернизация мехатронной системы приводов главного движения и движения  
подачи сферотокарного станка МК6033 производственного цеха  
ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ»

Нормоконтролер  
Преподаватель

\_\_\_\_\_ О.А. Гасиярова

Консультант по проверке ВКР на  
оригинальность  
Ст. преподаватель

\_\_\_\_\_ С.С. Воронин

Руководитель работы  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ В.Р. Гасияров

Автор работы  
студент группы П-264

\_\_\_\_\_ А.В. Смирнов

\_\_\_\_\_ 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

Смирнов А.В. Модернизация мехатронной системы приводов главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033 производственного цеха ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ». – Челябинск: ЮУрГУ, П-264; 2020, 92 с. 64 ил., 25 таблиц, библиогр. список – 26 наим., 2 прил.

Цель выпускной квалификационной работы магистра – разработка проекта модернизации мехатронной системы приводов главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033.

В первой главе выпускной квалификационной работы приведено описание объекта модернизации. Проведен анализ технологического процесса и сформулированы требования к модернизированной системе.

Во второй главе приведено описание решения задачи модернизации привода движения подачи.

В третьей главе приведено описание решения задачи модернизации привода главного движения.

В четвертой главе описан процесс разработки системы управления модернизированной системой.

В пятой главе описан процесс разработки функциональной схемы автоматизации модернизированной системы.

В шестой главе проведена разработка электротехнической документации модернизированной системы.

В седьмой главе приведено описание разработанной SCADA-системы и алгоритм работы системы.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ПОСТАНОВКА ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ МК6033 .....	8
1.1 Описание сферотокарного станка .....	8
1.2 Анализ исходного технологического процесса .....	9
1.3 Требования к модернизированной системе МК6033 .....	12
2 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ ПОДАЧИ МС МК6033 .....	13
2.1 Решение задачи позиционирования абразивного инструмента .....	13
2.1.1 Описание и принцип работы гибридного шагового двигателя.....	15
2.1.2 Математическое описание гибридного шагового двигателя.....	22
2.1.3 Вывод о возможности применения гибридного ШД при модернизации .....	27
2.2 Выбор элементной базы мехатронной системы привода движения подачи.....	29
2.2.1 Построение тахограммы работы привода движения подачи .....	29
2.2.2 Построение нагрузочной диаграммы привода движения подачи....	31
2.3 Подбор исполнительных элементов мехатронной системы привода движения подачи .....	37
2.3.1 Выбор сервопривода.....	37
2.3.2 Выбор модуля линейных перемещений.....	41
2.4 Разработка математической модели замкнутой системы .....	42
2.5 Протокол связи мехатронной системы привода движения подачи .....	44
2.6 Подключение мехатронного модуля движения подачи.....	46

2.7 Программирование и настройка внутреннего ПЛК мехатронного модуля линейных перемещений .....	52
3 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МС МК6033.....	55
3.1 Выбор частотного преобразователя .....	56
3.2 Протокол связи мехатронной системы главного движения .....	61
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МС МК6033 .....	66
4.1 Постановка требований к рабочему месту оператора МС МК6033 .....	66
4.2 Выбор программируемого логического контроллера .....	67
4.3 Выбор пульта управления .....	73
5 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МС МК6033 .....	75
6 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ МС МК6033.....	76
6.1 Разработка схемы электрической принципиальной питания .....	76
6.2 Перечень элементов модернизированной системы.....	80
7 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....	82
7.1 Разработка SCADA-системы управления сферотокарной обработкой.....	82
7.2 Описание экранов НМІ-панели .....	82
7.2.1 Стартовый экран МС МК6033 .....	83
7.2.2 Экран управления системой.....	83
7.2.3 Экран настройки системы .....	85
7.2.4 Экран статуса системы .....	86
7.3 Разработка алгоритма работы МС МК6033 .....	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Темой выпускной квалификационной работы магистра является разработка проекта модернизации мехатронной системы привода главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033 (далее: МС МК6033– модернизированная система МК6033).

Модернизируемый объект используется для шлифовальной обработки деталей сферической формы – затворов шаровых кранов. Шлифование является разновидностью механической обработки, позволяющей изменить показатель шероховатости поверхности обрабатываемого изделия и особенности формы изготавливаемой детали.

На базе имеющегося на предприятии «УРАЛ-АРМ» оборудования разработана управляющая система, представляющая собой совокупность чувствительных и исполнительных элементов, призванных облегчить процесс шлифовальной обработки, сделать производство более качественным и менее времязатратным.

# 1 ПОСТАНОВКА ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ МК6033

## 1.1 Описание сферотокарного станка

Модернизированная мехатронная система приводов главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033 включает в себя совокупность мехатронных систем и электронного оборудования, внедренных в конструкцию модернизируемого станка, позволяющих:

- осуществлять управление процессом сферотокарной обработки;
- визуализировать параметры технологического процесса.

В качестве объекта автоматизации был выбран сферотокарный станок марки МК6033. Внешний вид станка с указанием основных узлов представлен на рисунке 1.1.

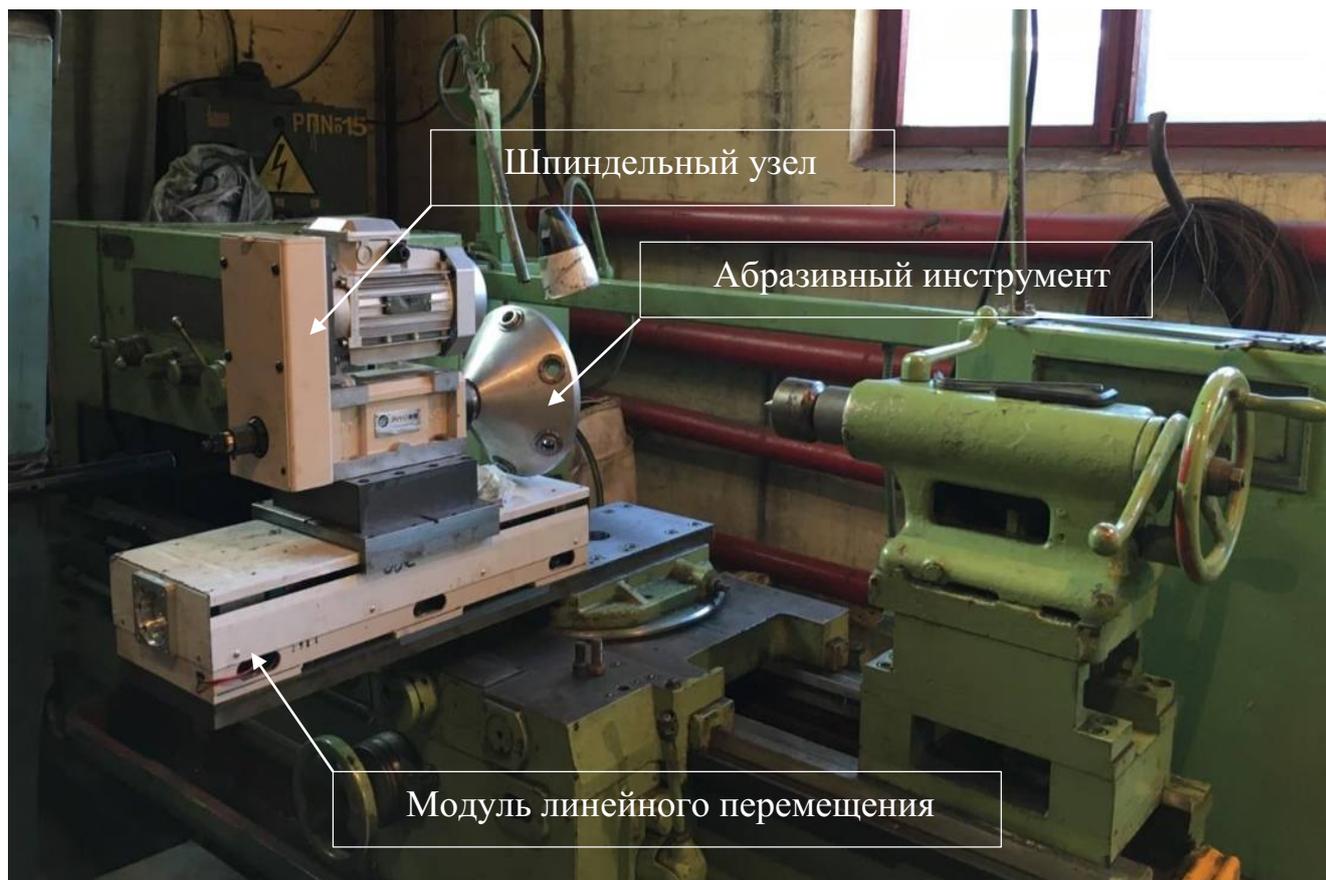


Рисунок 1.1. Сферотокарный станок МК6033, общий вид

Внешний вид абразивного инструмента МК6033 показан на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2. Абразивный инструмент станка МК6033

Станок МК6033 предназначен для проведения шлифовальной обработки деталей, имеющих сферическую форму. В настоящее время данный станок находится на балансе предприятия ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ», занимающегося производством оборудования для промышленных трубопроводных систем. МК6033 используется для производства затворных пробок промышленных шаровых кранов.

Находящийся на балансе станок МК6033 является устаревшим оборудованием, эксплуатация которого негативно сказывается на качестве изготавливаемой продукции и общей производительности цеха предприятия.

## 1.2 Анализ исходного технологического процесса

На рисунке 1.3 приведена схема станка МК6033 в его базовой комплектации, без проведения работ по модернизации оборудования.

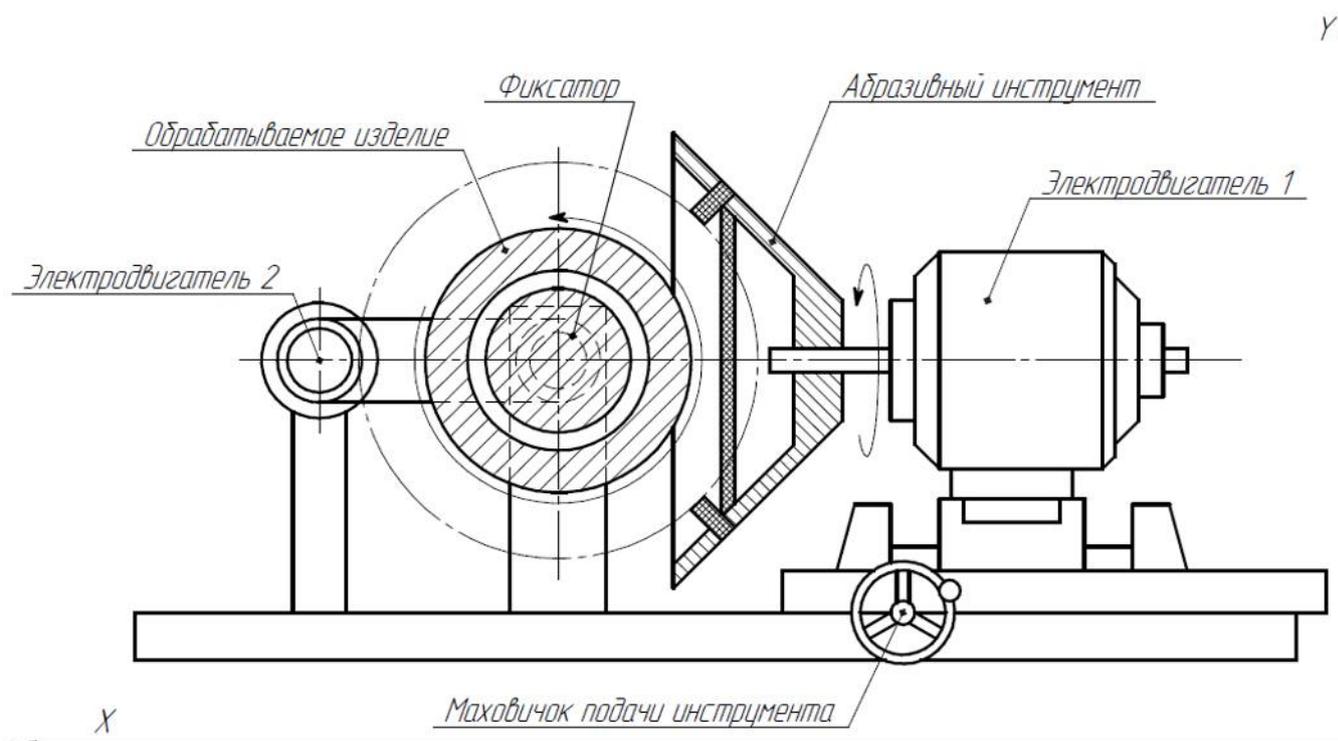


Рисунок 1.3. Схема МК6033

Рассмотрим поэтапно алгоритм сферотокарной обработки с использованием не-модернизированного оборудования (см. рисунок 1.3).

1. Обрабатываемое изделие устанавливается в расположенное горизонтально фиксирующее устройство, соединенное с электродвигателем 2, являющимся базовым конструктивным элементом станка;

2. Движение подачи по оси X осуществляется при помощи ручного привода: оператор при помощи маховичка подводит к заготовке абразивный инструмент, соединенный с электродвигателем 1;

3. По достижении абразивным инструментом заготовки включаются электродвигатели 1 и 2, передающие вращательное движение абразивному инструменту и зафиксированной заготовке;

4. Сферотокарная обработка реализуется путем взаимодействия заготовки, вращающейся относительно оси Z, с абразивным инструментом, вращающимся относительно оси X. Главное движение осуществляет электродвигатель 1, передающий вращательное движение абразивному инструменту;

5. По окончании процесса сферотокарной обработки все элементы станка возвращаются в исходное положение.

Решение задачи модернизации сферотокарного станка МК6033 связано с внедрением в конструкцию станка мехатронных систем и элементов автоматики, обеспечивающих наиболее эффективное функционирование привода главного движения и движения подачи. Далее выделим основные недостатки в работе немодернизированного оборудования, которые необходимо устранить в процессе модернизации.

Главное движение определяет скорость вращения абразивного инструмента при проведении сферотокарной обработки. Следует отметить, что необходимость регулирования скорости главного движения связана с особыми требованиями к обработке заготовок из мягких материалов, таких как латунь.

В базовой комплектации МК6033 главное движение реализуется при помощи встроенного электродвигателя. При работе с немодернизированным оборудованием оператор не имеет возможности:

- контролировать скорость вращения абразивного инструмента;
- наблюдать за текущим значением скорости главного движения.

Движение подачи определяет скорость врезания абразивного инструмента в обрабатываемую заготовку, а также точность позиционирования инструмента относительно заготовки по линейной координате.

В МК6033 движение подачи осуществляется при помощи ручного привода. При этом оператор не имеет возможности:

- контролировать точность позиционирования абразивного инструмента;
- управлять скоростью подвода инструмента;
- управлять движением подачи в шаговом режиме (постепенный подвод инструмента по линейной координате с минимально возможной дискретностью шага привода);
- наблюдать за изменением координаты и скорости перемещения инструмента.

### 1.3 Требования к модернизированной системе МК6033

В процессе анализа исходного технологического процесса, а также исходя из требований заказчика проекта модернизации ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ» был сформирован перечень требований к модернизации МК6033:

1. Модернизированная система привода движения подачи МС МК6033 должна обеспечивать перемещение абразивного инструмента по линейной координате с возможностью регулирования скорости перемещения, дискретность перемещений исходя из требований заказчика должна составлять менее 1 мкм (0,5...0,9 мкм);

2. Модернизированная система привода главного движения МС МК6033 должна обеспечивать вращение абразивного инструмента с заданной скоростью в процессе сферотокарной обработки.

Рабочее место оператора должно включать в себя НМІ-панель и пульт ручного управления:

1. НМІ-панель должна предоставлять информацию о ходе технологического процесса, также возможность ввода значений параметров технологического процесса:

- скорости движения подачи;
- координаты перемещения абразивного инструмента;
- скорости главного движения.

2. Пульт ручного управления должен иметь в своей конструкции:

– маховичок, предназначенный для подвода абразивного инструмента по линейной координате в шаговом режиме;

– кнопки для обеспечения ручного управления приводом движения подачи («ПУСК», «СТОП», «Запомнить координату», «Отступить от координаты», «Подвод к координате», «Вывод привода в ноль»).

## 2 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ ПОДАЧИ МС МК6033

### 2.1 Решение задачи позиционирования абразивного инструмента

Задача модернизации мехатронной системы привода движения подачи может быть решена путем внедрения в конструкцию сферотокарного станка МК6033 комплекса мехатронного оборудования, позволяющего обеспечивать позиционирование абразивного инструмента по линейной координате с точностью, удовлетворяющей требованиям заказчика (шаг привода  $0,5 \dots 0,9$  мкм).

Позиционирование абразивного инструмента по линейной координате с требуемой точностью может быть обеспечено путем установки мехатронного модуля линейных перемещений.

Схема модуля линейных перемещений приведена на рисунке 2.1.

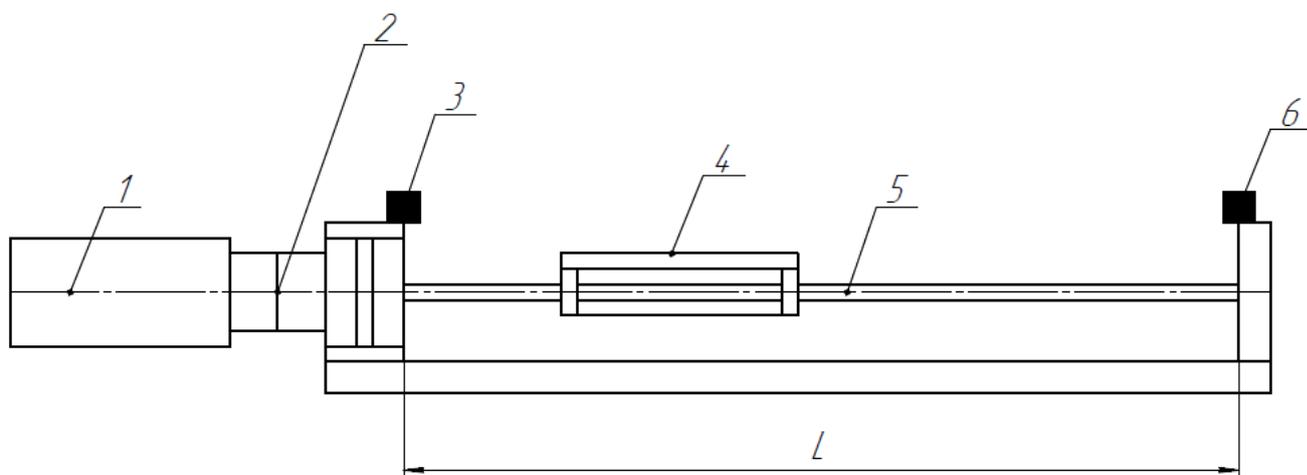


Рисунок 2.1. Схема модуля линейных перемещений

Модуль линейных перемещений состоит из следующих элементов (см. рисунок 2.1):

1. Двигателя;
2. Муфты;
3. Датчика начального положения каретки;
4. Каретки;

5. Винта ШВП;
6. Датчика конечного положения каретки.

Модуль линейных перемещений является исполнительным элементом, обеспечивающим перемещение каретки по линейной координате путем преобразования вращательного движения вала двигателя в поступательное при помощи винта ШВП. Шаг винта ШВП определяет величину линейного перемещения каретки за один оборот винта. Шаг зависит от диаметра винта ШВП, и соответственно от габаритов модуля линейных перемещений. Примем, что используемый при модернизации сферотокарного станка МК6033 модуль линейных перемещений имеет малые габариты, достаточные для перемещения абразивного инструмента станка. В большинстве современных моделях модулей линейных перемещений используются винты ШВП с диаметром 20 мм и шагом винта ШВП 5 мм соответственно.

Точность позиционирования каретки модуля линейных перемещений по линейной координате зависит от шага винта ШВП и от числа устойчивых положений на 1 оборот вала двигателя, обеспечивающего вращения винта. Данная зависимость определяется по формуле (2.1).

$$L_{ш} = \frac{L_{шВП}}{N_{д}}, \quad (2.1)$$

где  $L_{ш}$  – величина шага позиционирования каретки модуля линейных перемещений, мкм;  $L_{шВП}$  – величина шага на 1 оборот винта ШВП, мкм;  $N_{д}$  – число устойчивых положений на 1 оборот вала двигателя.

Таким образом, задача обеспечения требуемой заказчиком точности позиционирования связана с необходимостью подбора двигателя, имеющего наибольшее число устойчивых положений на 1 оборот вала. Среди современных моделей электродвигателей наиболее подходящими для решения данной задачи являются гибридные шаговые двигатели.

### 2.1.1 Описание и принцип работы гибридного шагового двигателя

Шаговый двигатель – это электромеханическое устройство, преобразующее электрические импульсы в дискретные механические перемещения. Угол поворота ротора шагового двигателя определяется числом импульсов, которые поданы на двигатель. Угловая скорость ротора при этом пропорциональна частоте импульсов.

Шаговый двигатель обеспечивает полный момент в режиме остановки (при запитанных обмотках), высокую точность позиционирования (до 3...5% от величины шага) и повторяемость. Основным конструктивным параметром шагового двигателя является его угловой шаг  $S$  – минимальный угол, на который может повернуться ротор двигателя. Современные модели шаговых двигателей могут обеспечить величину углового шага  $S$  от 3,6 до 0,9°. Дискретность таких шаговых двигателей составляет от 100 до 400 устойчивых положений (дискрет) ротора на один оборот. Столь малый угловой шаг достигается за счет особенностей конструкции гибридных шаговых двигателей, рисунки 2.2 и 2.3.

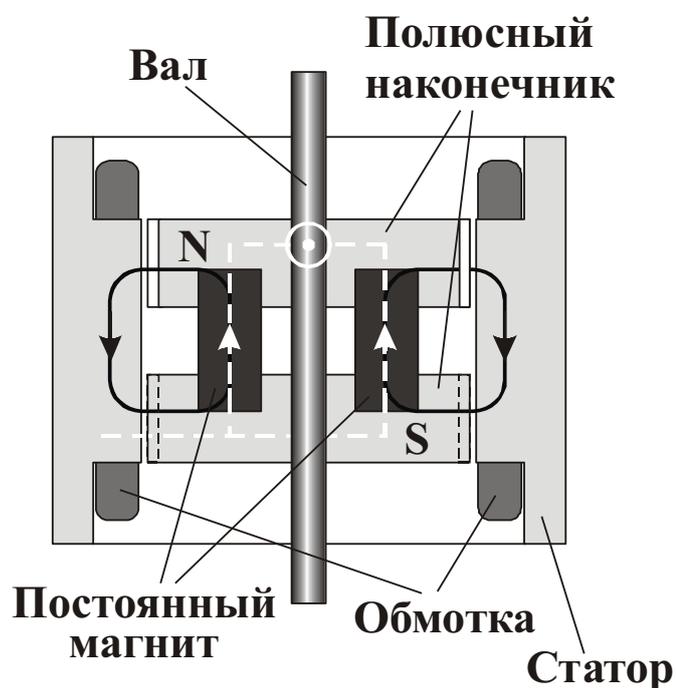


Рисунок 2.2. Схема гибридного ШД (осевой разрез)

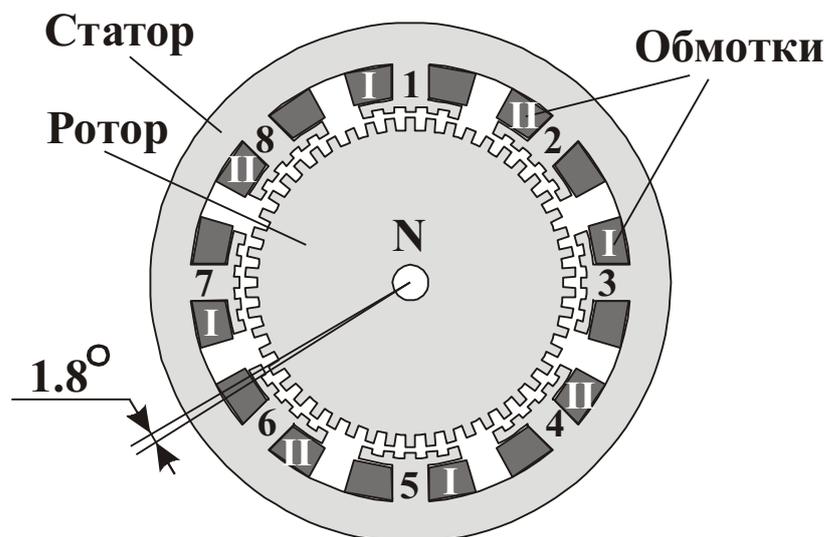


Рисунок 2.3. Схема гибридного ШД  
(радиальный разрез)

Ротор гибридного шагового двигателя является составным и включает в себя полюсные наконечники (зубья) из магнитомягкого материала и постоянные магниты. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении, также ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, северными полюсами являются зубцы верхней половины ротора, а южными – зубцы нижней половины. Также, верхняя и нижняя части ротора повернуты относительно друг друга на величину половины угла шага зубцов. Соответственно, число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половин.

Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом обмоток определяет угловой шаг  $S$  двигателя:

$$S = \frac{360}{N_{\text{ПР}} N_{\text{ОБ}}}, \quad (2.2)$$

где  $N_{\text{ПР}}$  – число эквивалентных полюсов на обмотку, равное удвоенному числу пар полюсов ротора;  $N_{\text{ОБ}}$  – число обмоток.

Ротор показанного на рисунках 2.2 и 2.3. гибридного шагового двигателя имеет 50 пар полюсов, двигатель имеет 2 обмотки, поэтому угловой шаг равен  $1.8^\circ$ , а количество дискрет на оборот составляет 200.

На рисунке 2.2 стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента. На рисунке видно, что воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубьев. Поэтому существуют другие магнитные цепи, которые содержат минимальные воздушные зазоры и, как следствие, обладают минимальным магнитным сопротивлением. По этим цепям замыкается другая часть магнитного потока, которая и создает статический момент, удерживающий ротор шагового двигателя в устойчивом положении (положении равновесия) при незапитанных обмотках. На рисунке 2.3 штриховой белой линией показана одна из имеющихся цепей с минимальным магнитным сопротивлением – от нижней части 7-го основного полюса статора к верхней части 5-го основного полюса, см. рисунок 2.3.

Очевидно, что минимальность магнитного сопротивления возникает в случае, когда зубцы ротора находятся напротив зубцов статора. Из рисунка 2.3 видно, что для перевода ротора в новое устойчивое положение его необходимо повернуть на  $1.8^\circ$  в любом направлении. При этом появятся новые цепи с минимальным магнитным сопротивлением. Например, при повороте ротора на угол  $1.8^\circ$  по часовой стрелке возникнут следующие цепи:

- от нижней части 8-го основного полюса статора к верхней части 6-го основного полюса;
- от нижней части 8-го основного полюса статора к верхней части 2-го основного полюса;
- от нижней части 4-го основного полюса статора к верхней части 6-го основного полюса;
- от нижней части 4-го основного полюса статора к верхней части 2-го основного полюса.

Таким образом, угловой шаг  $S$  – это угол между устойчивыми положениями ротора шагового двигателя при незапитанных обмотках.

При протекании через обмотку электрического тока она создает магнитное поле, которое стремится повернуть ротор в положение, определяемое магнитным взаимодействием полюсов ротора и статора. Вращение ротора достигается последовательной коммутацией обмоток. Способы коммутации обмоток показаны на рисунке 2.4.

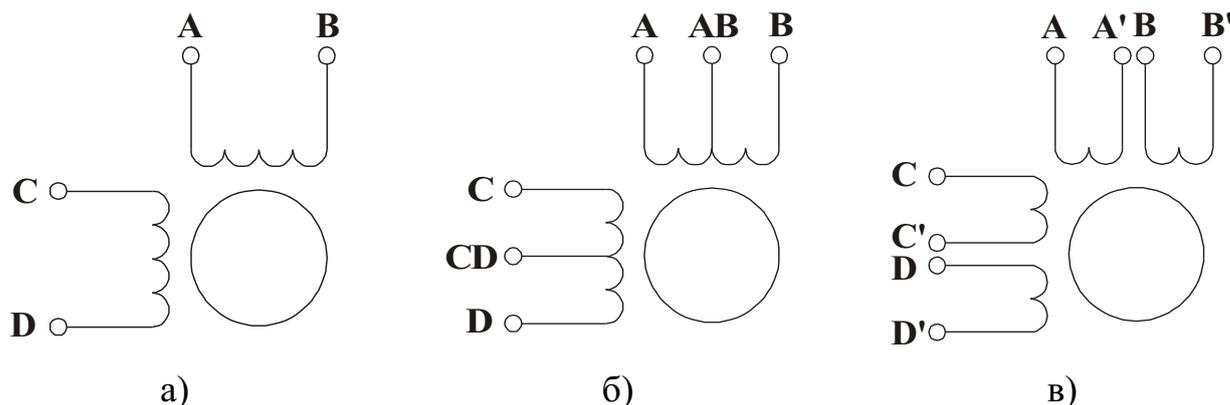


Рисунок 2.4. Способы коммутации обмоток ШД

В зависимости от конфигурации обмоток шаговые двигатели делятся на:

- биполярные;
- униполярные.

Биполярный двигатель имеет обмотки без отводов, поэтому для изменения направления магнитного поля, создаваемого обмоткой, в ней должно изменяться направление протекания электрического тока. Биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рисунок 2.4,а).

Униполярный двигатель имеет также две обмотки, при этом от середины каждой обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением ее половин. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов (рисунок 2.4,б). Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего присутствует 8 выводов (рисунок 2.4,в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как

биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными.

Шаговые двигатели оцениваются следующими параметрами и характеристиками:

- частота собственных круговых колебаний;
- электромагнитная постоянная времени;
- предельная механическая характеристика.
- Частота собственных круговых колебаний  $\omega_0$  – это угловая частота колебаний

ротора шагового двигателя около устойчивого положения при отсутствии момента нагрузки. Частота собственных круговых колебаний определяется следующей формулой (2.3):

$$\omega_0 = \frac{S \cdot M_{MAX}}{J_P + J_H} \cdot \frac{1}{8\pi}, \quad (2.3)$$

где  $J_P + J_H$  – момент инерции ротора двигателя с присоединенной нагрузкой;  $M_{MAX}$  – величина максимального синхронизирующего момента;  $S$  – угловой шаг.

Электромагнитная постоянная времени обмоток управления определяется по формуле (2.4).

$$T_{ЭМ} = \frac{L}{R}, \quad (2.4)$$

где  $L$  – индуктивность обмотки двигателя;  $R$  – активное сопротивление обмотки двигателя, характеризует скорость протекания электромагнитных переходных процессов.

Предельная механическая характеристика – это зависимость допустимого момента сопротивления от частоты управляющих импульсов в установившемся режиме работы. С ростом частоты сказывается запаздывание в нарастании тока, обусловленное индуктивностью обмоток. При некоторой предельной частоте момент двигателя становится равным нулю.

Характер движения ротора шагового двигателя определяется частотой и характером изменения управляющих импульсов. В зависимости от этого различают следующие режимы работы шагового двигателя:

- статический;
- квазистатический;
- установившейся;
- переходный.

Статический режим – это режим, при котором по обмоткам статора протекает постоянный ток, создающий неподвижное в пространстве магнитное поле, а ротор не вращается.

Квазистатический режим – это режим отработки единичных шагов, при котором переходные процессы от предыдущего такта коммутации полностью затухли и скорость ротора в начале следующего шага равна нулю. Он используется в механизмах, в которых требуется фиксация ротора после каждого шага. Предельная частота управляющих импульсов, при которой еще соблюдается квазистатический режим, определяется временем протекания электромагнитных и особенно электромеханических переходных процессов, т.е. временем колебаний ротора. Для уменьшения или полного устранения колебаний ротора в конце шага применяют различные приемы. Например, при принудительном торможении после перевода управляющего импульса с первой обмотки или группы обмоток на вторую через некоторый промежуток времени, в течение которого ротор отработает часть шага и запасет определенное количество кинетической энергии, управляющий импульс вновь переводится на первую обмотку. На ротор начинает действовать тормозной момент. При правильном выборе времени и величины тормозящего момента ротор остановится в конце шага, после чего управляющий импульс переводится на вторую обмотку и ротор, отработав шаг, фиксируется в заданном положении практически без колебаний.

Повысить предельную частоту квазистатического режима можно путем увеличения числа обмоток статора или числа тактов коммутации. Во всех этих случаях

снижается угол перемещения и кинетическая энергия ротора, что уменьшает его склонность к колебаниям.

Установившийся режим – это режим, соответствующий постоянной частоте следования управляющих импульсов. При частоте управляющих импульсов

$f_{УПР} < \frac{\omega_0}{2\pi}$  движение ротора носит колебательный характер, что увеличивает динамическую ошибку при отработке заданного перемещения. При частоте управляющих импульсов  $f_{УПР} = \frac{\omega_0}{2\pi k}$ , где  $k$  – целое число, возникает явление электромеханического резонанса, которое при слабом демпфировании колебаний может привести к нарушению нормального движения ротора и выпадению его из синхронизма.

При  $f_{УПР} > \frac{\omega_0}{2\pi}$  имеют место вынужденные колебания с частотой управляющих импульсов; амплитуда их монотонно уменьшается с увеличением частоты. Устойчивость работы шагового двигателя определяется следующими неравенствами (2.5, 2.6):

$$\frac{M_{MAX}}{M_H} > 2, \quad (2.5)$$

$$\frac{J_H}{J_P} < 1...2, \quad (2.6)$$

где  $M_H$  – момент на нагрузке.

Переходный режим – это основной эксплуатационный режим работы шагового двигателя. Он включает в себя пуск, реверс, торможение, переход с одной управляющей частоты на другую. Физические процессы в переходных режимах определяются как параметрами двигателя и его нагрузки, так и начальными условиями, при которых начинается переходный процесс. Основное требование к шаговому двигателю в переходных режимах заключается в отсутствии потери шага, т.е. сохранение синхронизма при любом характере изменения управляющих импульсов.

В простейшем случае пуск шагового двигателя осуществляется из неподвижного положения ротора, которое он занимает при установившихся значениях токов

в обмотках, путем скачкообразного увеличения частоты управляющих импульсов от нуля до рабочих. При этом ротор вначале отстает от поля, затем, ускоряясь, достигает частоты вращения поля, опережает его и вследствие отрицательного синхронизирующего момента снова замедляет свое движение. Вследствие демпфирования колебания скорости вращения быстро затухают, наступает установившийся режим. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск без потери шага, называется частотой приемистости  $f_{\text{ПР}}$ . Для современных шаговых двигателей частота приемистости достигает сотен Гц.

Торможение шагового двигателя может осуществляться скачкообразным снижением частоты управляющих импульсов от рабочего значения до нуля. Предельная частота, при которой ротор останавливается без потери шага, как правило, выше частоты приемистости, что объясняется внутренним демпфированием – электромагнитным тормозным моментом, моментом сопротивления нагрузки и трением в опорах.

Реверс шагового двигателя производится путем изменения последовательности коммутации токов в обмотках, приводящего к изменению направления вращения магнитного поля на обратное. Предельная частота управляющих импульсов, при которой реализуется реверс без потери шага, всегда меньше частоты приемистости и составляет  $\frac{f_{\text{ПР}}}{2...5}$ .

### 2.1.2 Математическое описание гибридного шагового двигателя

Математическая модель гибридного шагового двигателя составлена на основе уравнений электрических цепей обмоток. Система уравнений, описывающая процесс электромеханического преобразования энергии согласно [1] является следующей:

$$\begin{cases} U_A + I_A R_A + L \frac{dI_A}{dt} - \omega p \psi \sin(p\varphi); \\ U_B + I_B R_B + L \frac{dI_B}{dt} - \omega p \psi \sin(p\varphi); \\ U_A = p\varphi(I_B \cos(p\varphi) - I_B \cos(p\varphi)); \\ J_{ДВ} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_E - M_C, \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $U_A$  – напряжение обмотки А шагового двигателя;  $I_A$  – ток обмотки А шагового двигателя;  $R_A$  – сопротивление обмотки А шагового двигателя;  $L$  – индуктивность;  $U_B$  – напряжение обмотки В шагового двигателя;  $I_B$  – ток обмотки В шагового двигателя;  $R_B$  – сопротивление обмотки В шагового двигателя;  $\psi$  – амплитудное потокосцепление;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;  $\varphi$  – угол поворота ротора;  $J_{ДВ}$  – момент инерции ротора;  $p$  – число зубцов ротора;  $M_E$  – суммарный электромагнитный момент вала двигателя;  $M_C$  – момент статического сопротивления вала двигателя.

Математическая модель включает в себя:

1. Уравнения напряжений каждой из фаз, полученные согласно схеме замещения обмоток;
2. Уравнение движения ротора двигателя под действием электромагнитного вращающего момента и момента статического сопротивления.

Для модели справедлива следующая система допущений:

1. Магнитная цепь линейна, магнитная проницаемость стали равна бесконечности, т.е. насыщение стали не учитывается, падение магнитного напряжения в стали отсутствует;
2. Сердечники считаются гладкими, рабочий зазор – равномерным, зубчатость сердечников не учитывается;
3. Учитываются только основные гармоники тока, магнитодвижущей силы (МДС), потока и ЭДС, т.е. не учитывается дискретность обмоток и порождаемые ею пространственные гармоники поля;
4. Взаимной индуктивностью обмоток пренебрегаем;

5. Влияние вихревых токов в магнитопроводе не учитываем.

Сформируем систему нелинейных уравнений, описывающих процесс электро-механического преобразования энергии в гибридном шаговом двигателе

В качестве базовой примем модель, описанную в уравнении (2.7).

Выражения для напряжений питания каждой из фаз останутся без изменений. Величина потокосцепления фазы будет определена численно непосредственно при моделировании. Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_A + I_A R_A + L \frac{dI_A}{dt} - \omega p \psi \sin(p\varphi); \\ U_B + I_B R_B + L \frac{dI_B}{dt} - \omega p \psi \sin(p\varphi), \end{cases} \quad (2.8)$$

Уравнение динамики движения ротора под действием полей постоянных магнитов и обмотки управления будет иметь вид:

$$J_{ДВ} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_O - M_{ПМ} - M_{СТ}, \quad (2.9)$$

где  $M_O$  – момент, создаваемый в обмотках, равный  $M_A + M_B$ ;  $M_{ПМ}$  – момент, возникающий под действием поля постоянных магнитов;  $M_{СТ}$  – момент статора.

Уравнения моментов можно получить из уравнения баланса мощностей для каждой из обмоток [2]:

$$\begin{cases} U_A I_A = I_A^2 R_A + \frac{dW_A}{dt} + M_A \frac{dQ}{dt}; \\ U_B I_B = I_B^2 R_B + \frac{dW_B}{dt} + M_B \frac{dQ}{dt}, \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $U_A I_A$  – потребляемая мощность обмотки А;  $U_B I_B$  – потребляемая мощность обмотки В;  $I_A^2 R_A$  – мощность тепловых потерь обмотки А;  $I_B^2 R_B$  – мощность тепловых потерь обмотки В;  $\frac{dW_A}{dt}$  – изменение энергии магнитного поля в соответствующих воздушных зазорах обмотки А;  $\frac{dW_B}{dt}$  – изменение энергии магнитного поля

в соответствующих воздушных зазорах обмотки В;  $M_A \frac{dQ}{dt}$  – механическая мощность обмотки А;  $M_B \frac{dQ}{dt}$  – механическая мощность обмотки В;  $Q$  – механическая работа по угловому перемещению.

Энергия магнитного поля вычисляется по следующей формуле (2.11):

$$\begin{cases} W_A = \frac{1}{2} I_A^2 L_A; \\ W_B = \frac{1}{2} I_B^2 L_B, \end{cases} \quad (2.11)$$

Подставив (2.11) в (2.10), получим:

$$\begin{cases} I_A \frac{d\psi_A}{dt} = \frac{dW_A}{dt} + M_A \frac{dQ}{dt}; \\ I_B \frac{d\psi_B}{dt} = \frac{dW_B}{dt} + M_B \frac{dQ}{dt}, \end{cases} \quad (2.12)$$

Выведем выражение для моментов (2.13):

$$\begin{cases} M_A = I_A \frac{d\psi_A}{dQ} - \frac{dW_A}{dQ}; \\ M_B = I_B \frac{d\psi_B}{dQ} - \frac{dW_B}{dQ}, \end{cases} \quad (2.13)$$

Уравнения для потокосцепления обмоток А и В без учета взаимоиндукции имеют вид (2.14):

$$\begin{cases} \psi_A = I_A L_A + \psi_M \cos \varphi; \\ \psi_B = I_B L_B + \psi_M \cos \varphi, \end{cases} \quad (2.14)$$

где  $\psi_M$  – потокосцепление поля постоянных магнитов ротора шагового двигателя.

Выражения для определения индуктивности обмоток А и В:

$$\begin{cases} L_A = w^2 G_A; \\ L_B = w^2 G_B, \end{cases} \quad (2.15)$$

где  $G_A$  – проводимость магнитной цепи фазы А;  $G_B$  – проводимость магнитной цепи фазы В.

$w$  – величина, равная отношению радиуса витка обмотки к длине витка.

Выражения для момента каждой из фаз (2.16):

$$\begin{cases} M_A = \frac{w^2 I_A}{2} \frac{dG_A(Q)}{dQ} + I_A \psi_M \sin \varphi; \\ M_B = \frac{w^2 I_B}{2} \frac{dG_B(Q)}{dQ} + I_B \psi_M \sin \varphi, \end{cases} \quad (2.16)$$

Статический момент, фиксирующий поля постоянных магнитов, может быть рассчитан по классической зависимости для электромеханического преобразователя как частная производная составляющей энергии магнитного поля, затраченной на выполнение механической работы  $Q$  по углу поворота вала (якоря) преобразователя [3]:

$$M_{ПМ} = \frac{dW_{ПМ}}{dQ} = \frac{H_{3M}^2 I_M^2}{2} \frac{dG_{эквПМ}(Q)}{dQ}, \quad (2.17)$$

где  $G_{эквПМ}$  – эквивалентная проводимость поля постоянных магнитов;  $H_{3M}$  – значение напряженности поля магнита при замыкании его на внешнюю магнитную цепь;  $I_M$  – длина магнита по средней линии [4].

Выражения для эквивалентных проводимостей как функций угла поворота ротора имеют вид:

$$\begin{cases} G_{эквO}(Q) = \frac{1}{\sum R_{эквO}(Q)}; \\ G_{эквПМ}(Q) = \frac{1}{\sum R_{эквПМ}(Q)}, \end{cases} \quad (2.18)$$

где  $G_{эквO}$  – эквивалентная проводимость обмоток шагового двигателя;  $R_{эквO}$  – эквивалентное сопротивление обмоток шагового двигателя;  $R_{эквПМ}$  – эквивалентное сопротивление поля постоянных магнитов.

Таким образом, уравнения (2.8), (2.9), (2.16), (2.17), (2.18) представляют собой нелинейную математическую модель гибридного шагового двигателя.

### 2.1.3 Вывод о возможности применения гибридного ШД при модернизации

Воспользуемся формулой (2.1) для определения точности позиционирования каретки модуля линейных перемещений при помощи гибридного ШД. Примем, что используемая модель ШД имеет 400 устойчивых положений (дискрет) ротора на один оборот (см. пункт 2.1.1), а модуль линейных перемещений имеет шаг 5мм или 5000мкм на 1 оборот:

$$L_{ш} = \frac{5000}{400} = 12,5.$$

Таким образом, даже при использовании в модернизированной системе гибридного шагового двигателя с минимальной величиной углового шага точность позиционирования не соответствует требованиям заказчика (менее 1 мкм, 0,5...0,9 мкм). Данную проблему можно решить путем использования вид замкнутой системы управления гибридным ШД с дискретностью датчика обратной связи, позволяющей увеличить число дискрет на один оборот вала двигателя, рисунок 2.5.

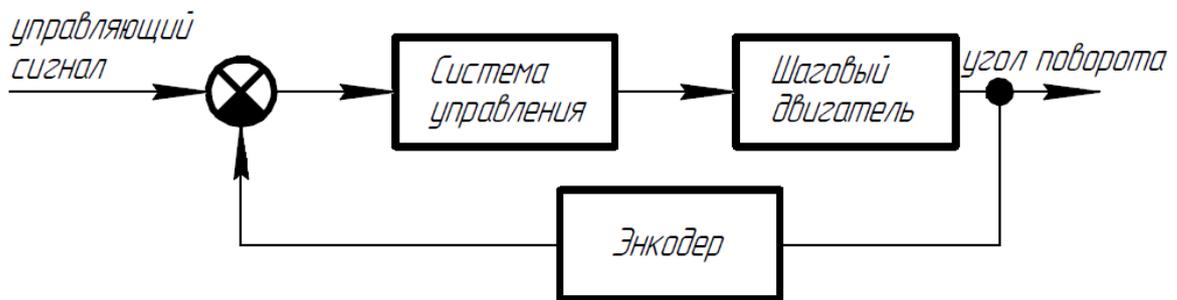


Рисунок 2.5. Структурная схема замкнутой системы

В замкнутой системе реализуется обратная связь по положению. Число устойчивых положений (дискрет) на 1 оборот вала шагового двигателя определяется дискретностью датчика обратной связи (энкодера).

Замкнутая система управления гибридным ШД с обратной связью по положению может быть реализована при помощи сервопривода.

Сервопривод состоит из совокупности следующих элементов:

- гибридного шагового двигателя;

- встроенного энкодера;
- встроенного ПЛК;
- встроенного частотного преобразователя;
- 2-х концевых выключателей.

Система управления сервопривода реализует 3 контура регулирования:

1. Контур регулирования по положению – основной;
2. Контур регулирования по скорости;
3. Контур регулирования по току.

Контур регулирования сервопривода реализованы как ПИ и ПИД регуляторы:

1. ПИ-регулятор по положению;
2. ПИД-регулятор по скорости;
3. ПИ-регулятор по току.

Структурная схема сервопривода приведена на рисунке 2.6.

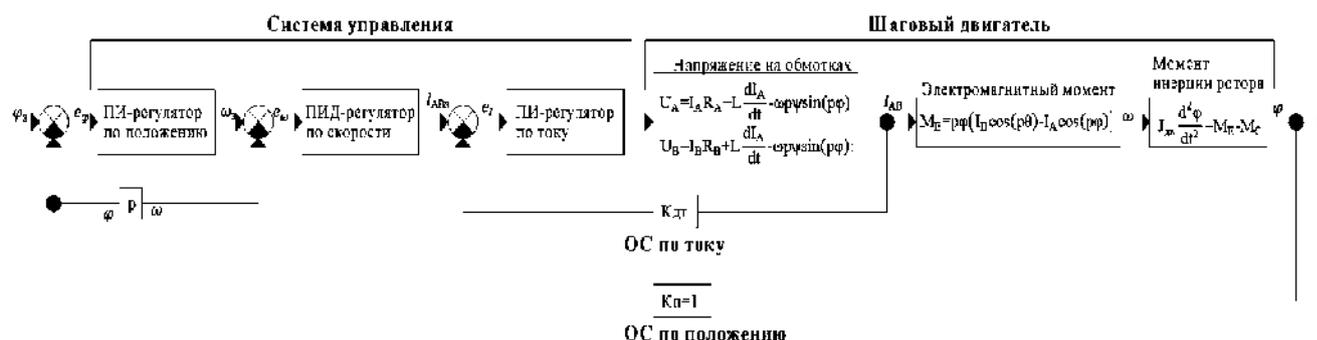


Рисунок 2.6. Структурная схема сервопривода

В структурной схеме сервопривода (см. рисунок 2.6) при описании шагового двигателя использованы уравнения напряжения на обмотках, электромагнитного момента и момента инерции ротора двигателя (см. пункт 2.1.2). При выборе реальной модели сервопривода коэффициенты регуляторов являются известными величинами, указанными производителем в документации на сервопривод [5].

Разрешение (дискретность) встроенного энкодера сервопривода может иметь значения от 1000 до 40000 имп/об. Примем дискретность встроенного энкодера

сервопривода равной 8000 имп/об. Применим формулу (2.1) для расчета шага модуля линейных перемещений при использовании интегрированного сервопривода в МС МК6033:

$$L_{ш} = \frac{5000}{8000} = 0,625 \text{ (мкм)}.$$

Таким образом, при использовании сервопривода в МС МК6033 дискретность модуля линейных перемещений составит 0,625 мкм, что полностью удовлетворяет требованиям заказчика ОАО ПГ «УРАЛ АРМ».

На основе структурной схемы сервопривода была разработана функциональная схема сервопривода, представленная на рисунке 2.7.

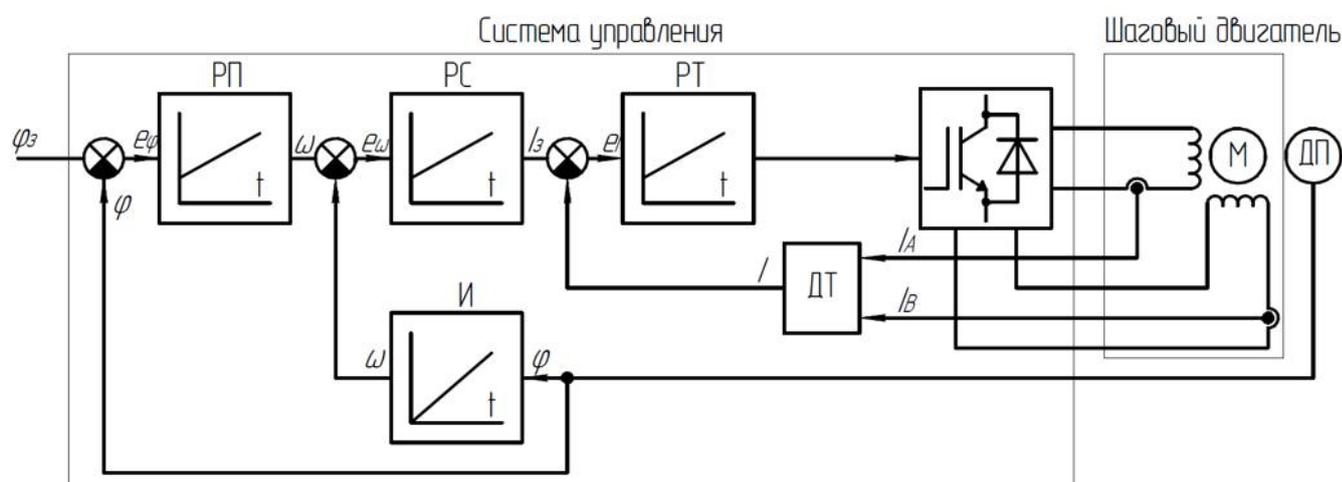


Рисунок 2.7. Функциональная схема сервопривода

## 2.2 Выбор элементной базы мехатронной системы привода движения подачи

### 2.2.1 Построение тахограммы работы привода движения подачи

Для подбора привода движения подачи составим тахограмму, описывающую изменение скорости в каждом из режимов работы привода.

Привод движения подачи должен обеспечивать работу в следующих режимах:

1. Разгон;
2. Перемещение;
3. Замедление до рабочей скорости;

4. Рабочая скорость (врезание);
5. Замедление до выстаивания;
6. Выстаивание (обработка);
7. Торможение.

Заказчиком ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ» были сформированы требования к характеристикам режимов работы привода движения подачи, таблица 2.1. Данные характеристики были утверждены технологами предприятия-заказчика.

Таблица 2.1. Требования заказчика к режимам работы привода

Наименование характеристики привода	Значение характеристики
Время разгона, с	0,1
Максимальная скорость движения подачи, м/с	0,25
Максимальная скорость врезания, м/с	0,001
Скорость выстаивания, м/с	0

Разработанная тахограмма привода движения подачи представлена на рисунке 2.8.

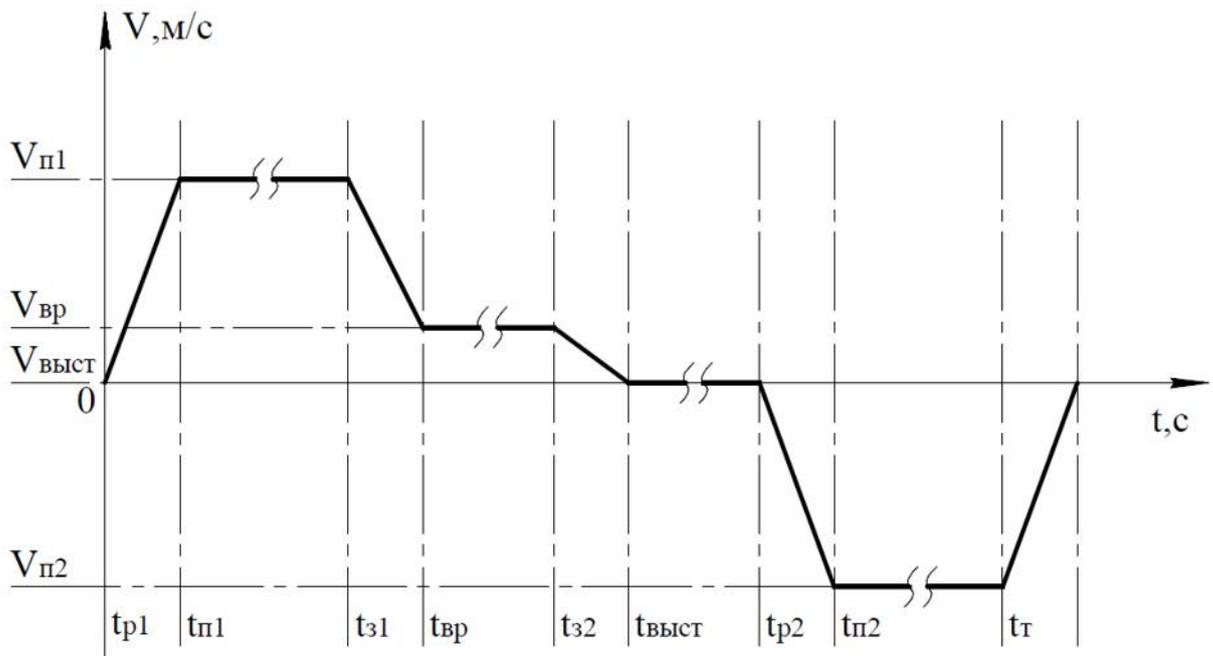


Рисунок 2.8. Тахограмма привода движения подачи

Тахограмма (см. рисунок 2.8), описывающая изменение скорости движения подачи за один цикл сферотокарной обработки, включает в себя 9 этапов, таблица 2.2.

Таблица 2.2. Этапы работы привода подачи

№ этапа	Наименование	Изменение скорости (м/с)	Ускорение (м/с <sup>2</sup> )
1	Разгон	0→0,25	2,5
2	Перемещение (ускоренная подача)	0	0
3	Замедление	0,25→0,001	минус 2,5
4	Врезание (рабочая подача)	0	0
5	Замедление	0,001→0	минус 2,5
6	Выстаивание (отсутствие подачи)	0	0
7	Разгон	0→0,25	2,5
8	Перемещение (ускоренная подача)	0	0
9	Торможение	0,25→0	минус 2,5

По тахограмме (см. рисунок 2.6) произведем расчет ускорений на каждом этапе.

Расчет ускорения на этапе разгона двигателя в начале цикла сферотокарной обработки произведем по следующей формуле (2.19):

$$a_1 = \frac{V_{n1}}{t_{p1}} = \frac{0,25}{0,1} = 2,5 \text{ (м/с}^2\text{)}, \quad (2.19)$$

где  $a_1$  – ускорение на этапе разгона;  $V_{n1}$  – максимальная скорость движения подачи;  $t_{p1}$  – время разгона.

Примем, что на этапах замедления и торможения ускорения также должны составлять 2,5 м/с<sup>2</sup> (по модулю), см. таблицу 2.2.

### 2.2.2 Построение нагрузочной диаграммы привода движения подачи

Используя тахограмму привода движения подачи, а также имея значения ускорений на каждом этапе работы привода (см. пункт. 2.2.1) построим нагрузочную

диаграмму. Для построения нагрузочной диаграммы привода необходимо построить графики изменения статического момента (нагрузочную диаграмму рабочей машины) и динамического момента, а затем просуммировать их.

Определим значения статического момента на каждом этапе цикла сферотокарной обработки (см. таблицу 2.2).

Статический момент на этапе перемещения определяется массой нагрузки и силами трения в системе. Так как в МС МК6033 перемещение абразивного инструмента (нагрузки) осуществляется по линейной координате в горизонтальном направлении, силу веса нагрузки не учитываем.

В системе линейного перемещения присутствуют следующие силы трения:

- сила трения в линейных направляющих модуля линейных перемещений;
- сила трения в ШВП.

Коэффициент трения в линейных направляющих модуля линейных перемещений согласно [6] составляет 0,003. Массу нагрузки примем равной 20 кг. Произведем расчет силы трения по следующей формуле (2.20):

$$F_{TP} = \mu \cdot N = 0,003 \cdot 20g = 0,588(\text{Н}), \quad (2.20)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $N$  – сила реакции опоры, определяемая как произведение массы нагрузки на ускорение свободного падения.

Произведем расчет статического момента на этапе перемещения как произведение силы трения в линейных направляющих на радиус винта ШВП с учетом механической эффективности ШВП. Согласно [7] КПД ШВП составляет 90%. Радиус винта ШВП составляет 0,01 м. Произведем расчет по следующей формуле (2.21):

$$M_{c1} = \frac{F_{TP} \cdot R}{\eta} = \frac{0,588 \cdot 0,01}{0,9} \approx 0,0065(\text{Н}\cdot\text{м}), \quad (2.21)$$

где  $R$  – радиус винта ШВП;  $\eta$  – КПД ШВП.

Статический момент на этапе врезания будет определяться силой резания. Сила резания – это результирующая сил сопротивления перемещению, действующих на инструмент в процессе обработки. Исходя из данных заказчика ОАО ПГ «УРАЛ-

АРМ» сила резания в процессе сферотокарной обработки составляет 250 Н. Вычислим статический момент на этапе врезания по следующей формуле:

$$M_{C2} = F_{BP} \cdot R + M_{C1} = 250 \cdot 0,01 + 0,0065 = 2,5065 \text{ (Н·м)}, \quad (2.22)$$

где  $F_{BP}$  – сила резания на этапе врезания в заготовку.

На этапе выстаивания абразивный инструмент неподвижен, а сила резания, характеризующая взаимодействие инструмента и заготовки, уменьшается по линейному закону. Соответственно, статический момент на этапе выстаивания не имеет составляющей, зависящей от сил трения в системе и уменьшается по линейному закону. На рисунке 2.9 представлен график изменения статического момента привода движения подачи.

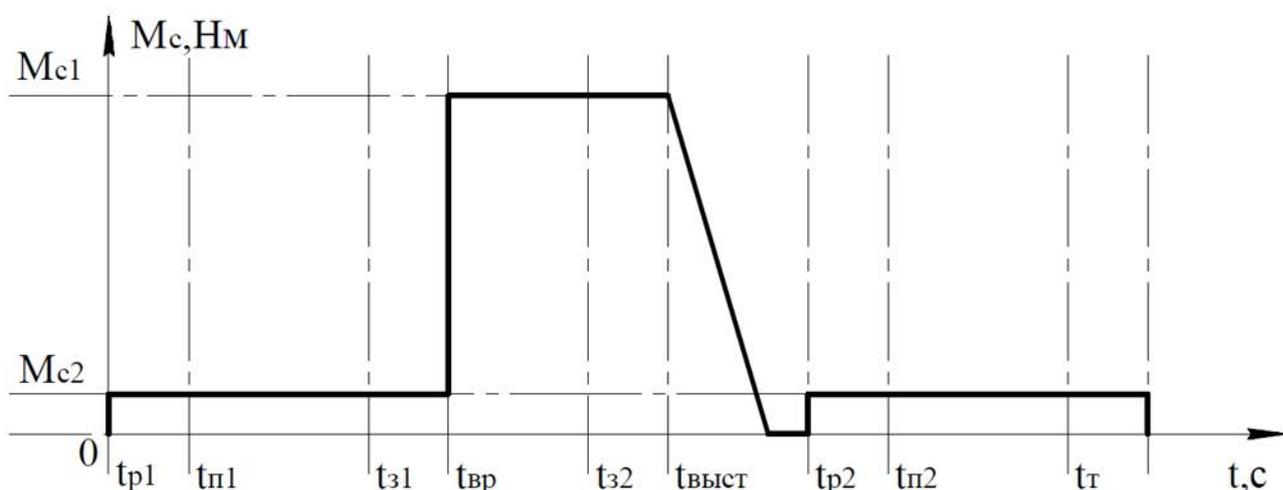


Рисунок 2.9. График статического момента

Построим график изменения динамического момента привода линейных перемещений. Динамический момент инерции возникает при изменении частоты вращения и обусловлен силами инерции всех без исключения движущихся частей системы. Таким образом, динамический момент возникает на этапах ускорения и торможения и вычисляется по следующей формуле (2.23):

$$M_{д} = J_{с} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.23)$$

где  $J_{с}$  – момент инерции системы;  $\frac{d\omega}{dt}$  – угловое ускорение вала двигателя.

Вычислим совокупный момент инерции системы. На рисунке 2.10 представлена кинематическая схема мехатронного модуля линейных перемещений.

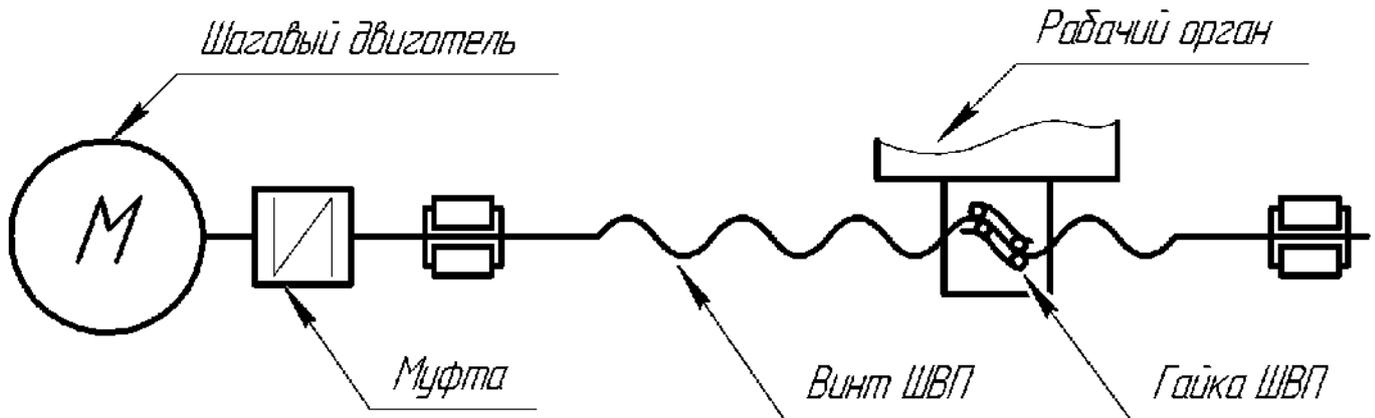


Рисунок 2.10. Схема модуля линейных перемещений

Основными компонентами модуля линейного перемещения являются:

1. Шаговый двигатель, обеспечивающий линейное перемещение;
2. Муфта, обеспечивающая передачу вращательного движения винту ШВП;
3. Гайка ШВП;
4. Рабочий орган – каретка на которой закреплено позиционируемое устройство.

Произведем расчёт момента инерции системы – мехатронного модуля линейных перемещений как сумму моментов инерции его составляющих (далее: см. рисунок 2.8) по следующей формуле:

$$J_C = J_{шд} + J_M + J_B + J_K, \quad (2.24)$$

где  $J_{шд}$  – момент инерции вала шагового двигателя;  $J_M$  – момент инерции муфты;  $J_B$  – момент инерции винта;  $J_K$  – момент инерции каретки, включающей в себя гайку ШВП и позиционируемое устройство.

Момент инерции вала шагового двигателя сервопривода согласно [5] составляет  $2,7 \cdot 10^{-4}$  (кг·м<sup>2</sup>).

Примем муфту в качестве цилиндра с известными размерами и массой [6]. Момент инерции муфты рассчитаем по следующей формуле:

$$J_M = \frac{mr^2}{2} = \frac{0,1 \cdot 0,01^2}{2} = 0,05 \cdot 10^{-4} \text{ (кг·м}^2\text{)}, \quad (2.25)$$

где  $r$  – радиус муфты;  $m$  – масса муфты. Примем винт ШВП в качестве цилиндра с известными размерами и массой [6]. Момент инерции винта рассчитаем по следующей формуле:

$$J_B = \frac{mr^2}{2} = \frac{1,35 \cdot 0,01^2}{2} = 0,675 \cdot 10^{-4} \text{ (кг}\cdot\text{м}^2\text{)}, \quad (2.26)$$

где  $r$  – диаметр винта;  $m$  – масса винта.

Момент инерции каретки рассчитаем как момент инерции гайки ШВП с учетом нагрузки рабочего органа (приняв гайку как вал с известным радиусом). Зная массу гайки [6] и ее радиус и приняв нагрузку равной 20 кг проведем расчет момента инерции каретки по следующей формуле:

$$J_B = \frac{(m_G + m_H)r^2}{2} = \frac{(0,05 + 20)0,03^2}{2} = 90,22 \cdot 10^{-4} \text{ (кг}\cdot\text{м}^2\text{)}, \quad (2.27)$$

где  $m_G$  – масса гайки ШВП;  $m_H$  – масса нагрузки каретки;  $r$  – радиус гайки ШВП.

По полученным моментам инерции элементов мехатронного модуля рассчитаем общий момент по формуле (2.24).

$$J_C = 2,7 \cdot 10^{-4} + 0,05 \cdot 10^{-4} + 0,675 \cdot 10^{-4} + 90,22 \cdot 10^{-4} = 93,645 \cdot 10^{-4}.$$

Зная значения времени разгона и скорости на этапе перемещения (см. пункт 2.2.1) вычислим угловое ускорение вала двигателя на этапе разгона:

$$\varepsilon_p = \frac{d\omega_p}{dt_{p1}} = \frac{\omega}{t_{p1}} = \frac{V_{n1}}{r} / t_{p1} = \frac{0,25}{0,1} / 0,1 = 25 \text{ (рад/с}^2\text{)}, \quad (2.28)$$

где  $\varepsilon_p$  – угловое ускорение вала двигателя на этапе разгона.

Примем, что на этапах замедления и торможения угловые ускорения также должны составлять 25 рад/с<sup>2</sup> (по модулю). По формуле (2.23) проведем расчет динамического момента:

$$M_D = 93,645 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \approx 0,234.$$

На рисунке 2.11 представлен график динамического момента привода движения подачи.

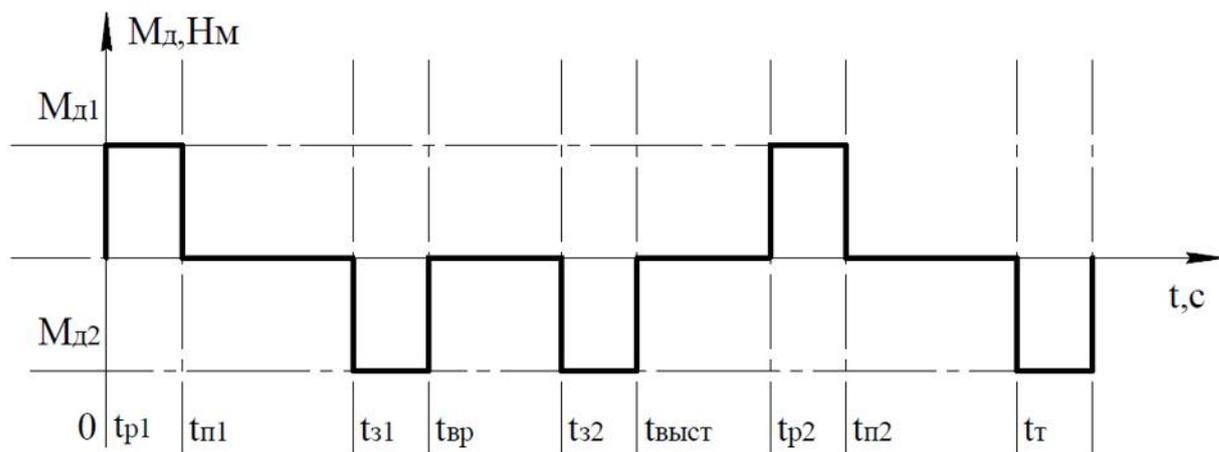


Рисунок 2.11. График динамического момента

На рисунке 2.12 приведена нагрузочная диаграмма привода движения подачи.

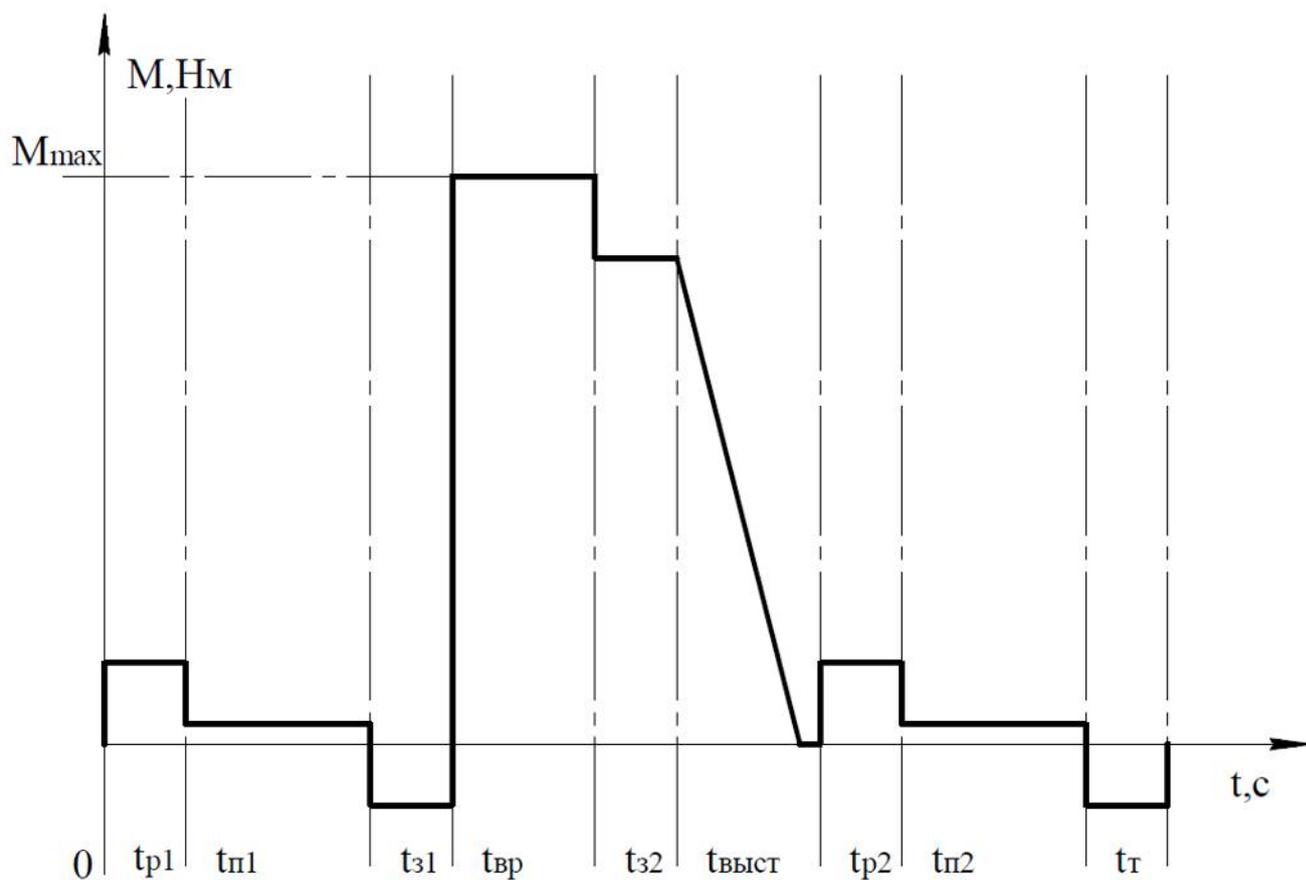


Рисунок 2.12. Нагрузочная диаграмма привода

Из нагрузочной диаграммы (см. рисунок 2.12) следует, что максимальная нагрузка возникает на этапе врезания. Максимальное значение нагрузки составляет

2,565 Н·м. Знание максимальной нагрузки в цикле сферотокарной обработки позволит произвести подбор сервопривода, позволяющего обеспечить необходимую силу резания.

### 2.3 Подбор исполнительных элементов мехатронной системы привода движения подачи

#### 2.3.1 Выбор сервопривода

Выбор сервопривода осуществлялся исходя из следующих требований:

- момент удержания – не менее 2,6 Н·м (для обеспечения требуемого момента на этапе врезания и необходимой силы резания исходя из требований заказчика и значения максимальной нагрузки в цикле сферотокарной обработки см. пункт 2.2.2);

- наличие встроенного энкодера с разрешением не менее 8000 дискрет на оборот;

- наличие концевых выключателей;

- тип двигателя – гибридный шаговый;

- возможность обмена данными с программируемым логическим контроллером;

- возможность подключения шины CAN [8] и приема сигналов интерфейса Step/Dir [9] для задания позиции вала двигателя.

Выдвигаемым требованиям соответствует интегрированный сервопривод СПШ20-34080 «Завода Мехатронных Изделий». Данный сервопривод представляет собой совокупность концевых выключателей, гибридного ШД, встроенного частотного преобразователя и программируемого логического контроллера.

Внешний вид интегрированного сервопривода СПШ20-34080 представлен на рисунке 2.14.

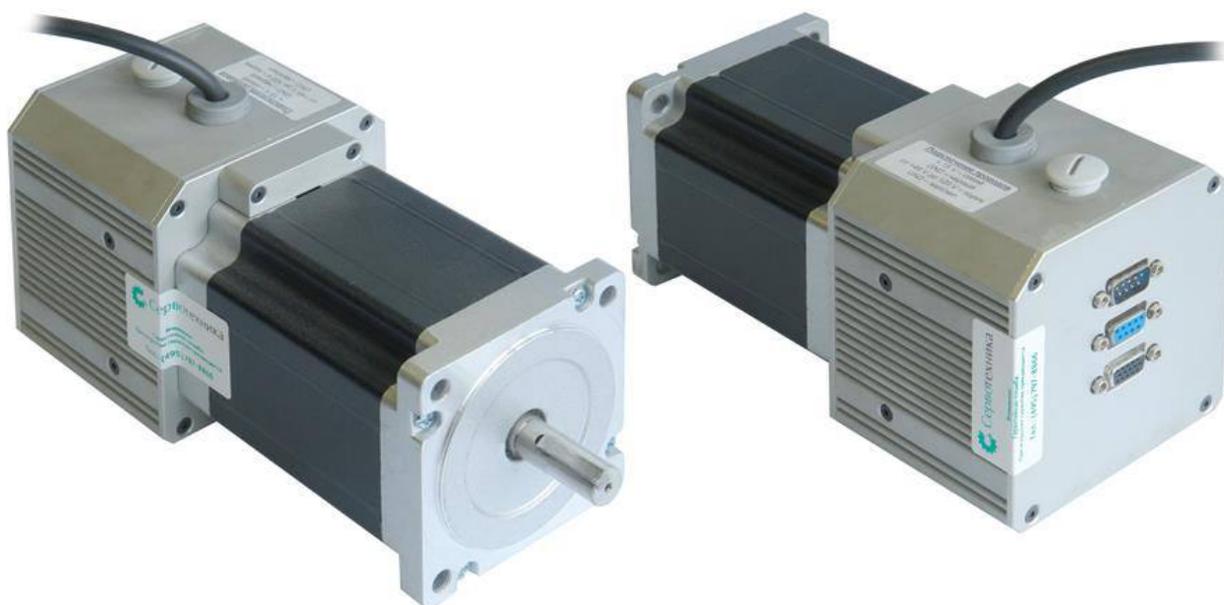


Рисунок 2.14. Сервопривод СПШ20-34080

Характеристики СПШ20-34080 приведены в таблице 2.3. Указания к подключению и обозначения контактов СПШ20-34080 приведены в [5].

Таблица 2.3. Характеристики СПШ20-34080

Номинальный ток, А	3
Выходная мощность, Вт	200
Момент удержания, Нм	8
Напряжение питания блока управления, В	15
Максимальный ток потребления блока управления, А	0,35
Напряжение питания силовой части, В	24
Момент инерции вала ротора, кг·см <sup>2</sup>	2,7
Разрешение встроенного энкодера, имп./об	8000
Наличие нулевой метки	есть
Интервал рабочих температур, °С	-20...+50
Тип двигателя	Гибридный шаговый
Масса, кг	6,4

Для питания блока управления сервопривода используют стабилизированный источник питания напряжением 15 В,  $\pm 10\%$  постоянного тока, мощностью не менее 5,25 Вт на один привод.

Питание сервопривода СПШ20-34080 осуществляется при помощи источника питания, рекомендованного производителем [5]. В состав источника питания входят трансформатор ОСМТ220/55/16 и блок питания БП30-34, рисунок 2.15.

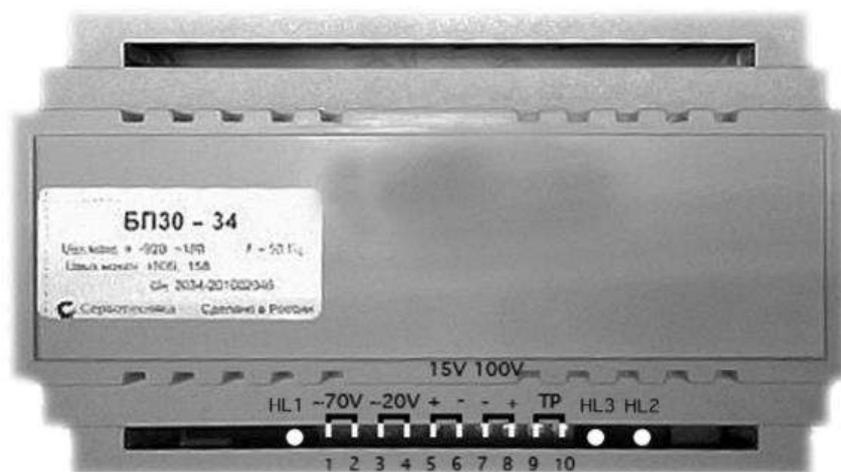


Рисунок 2.15. Блок питания БП30-34

Блок питания БП30-34 обеспечивает питание как силовой части сервопривода СПШ20, так и цифровой – встроенных ПЛК и частотного преобразователя. Характеристики блока питания БП30-34 приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Характеристики БП30-34

Входное силовое напряжение	не более 90 В
Входное цифровое напряжение	не более 20 В
Максимальное выходное напряжение, В	160
Максимальный ток силового питания, А	8
Рабочая температура окружающей среды	+5°C...+35°C

Схема питания сервопривода СПШ20-34080 приведена на рисунке 2.16.

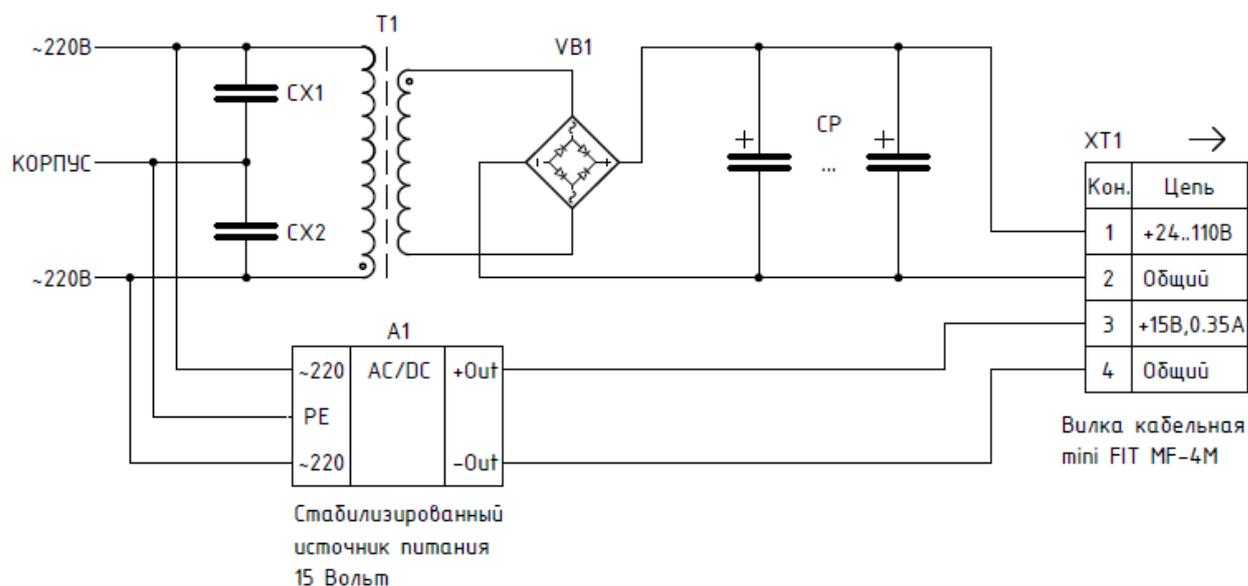


Рисунок 2.16. Схема питания сервопривода

Произведем выбор автоматического выключателя, служащего для защиты системы в случае короткого замыкания в трансформаторе.

Автоматические выключатели являются коммутационными электрическими аппаратами, предназначенными для проведения тока цепи в нормальных режимах и для автоматической защиты электрических сетей и оборудования от аварийных режимов (токов короткого замыкания, токов перегрузки, снижения или исчезновения напряжения, изменения направления тока, возникновения магнитного поля мощных генераторов в аварийных условиях и др.), а также для нечастой коммутации номинальных токов.

Выбор автомата выполнен, исходя из следующих требований:

- 1 фаза;
- ручное переключение;
- номинальный ток срабатывания – 6 А;
- номинальное напряжение – 230 В;
- возможность монтажа на DIN-рейку (для установки в шкаф автоматике).

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет трехфазный автоматический выключатель 11004DEK фирмы Schneider DEKraft [10].

Внешний вид автомата защиты показан на рисунке 2.17. Характеристики устройства приведены в таблице 2.5.



Рисунок 2.17. Автоматический выключатель 11004DEK

Таблица 2.5. Характеристики однофазного автомата 11004DEK

Номинальный ток, А	6
Номинальное напряжение, В	240
Количество силовых полюсов	1
Частота, Гц	50

### 2.3.2 Выбор модуля линейных перемещений

Выбор модуля линейных перемещений осуществлялся исходя из следующих требований:

- возможность перемещения нагрузки массой до 20 кг по линейной координате;
- шаг винта ШВП не более 5 мм.

Выдвигаемым требованиям соответствует модуль линейных перемещений СТМТ-1 «Завода Мехатронных Изделий». Внешний вид модуля линейных перемещений показан на рисунке 2.18. Характеристики СТМТ-1 приведены в таблице 2.6. Чертеж модуля линейных перемещений СТМТ-1 приведен в [11]. Указания к установке СТМТ-1 приведены в [12].



Рисунок 2.18. Модуль СТМТ-1

Таблица 2.6. Характеристики СТМТ-1

Тип механической передачи	ШВП
Диаметр винта ШВП, мм	20
Шаг винта ШВП, мм	5
Класс точности ШВП	C5
Ошибка шага на 1 поворот, мкм	8
Размер рабочей поверхности каретки, мм	240x248
Расстояние до оси винта, мм	83
Точность позиционирования на длине 300 мм, мкм	23
Повторяемость, мкм	±20
Тип направляющих	Рельсовые качения

#### 2.4 Разработка математической модели замкнутой системы

Произведем моделирование работы замкнутой системы управления гибридным шаговым двигателем с использованием программной среды Matlab Simulink.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

Шаговый двигателя является частью мехатронного модуля линейного перемещения. Модель системы представлена на рисунке 2.19.

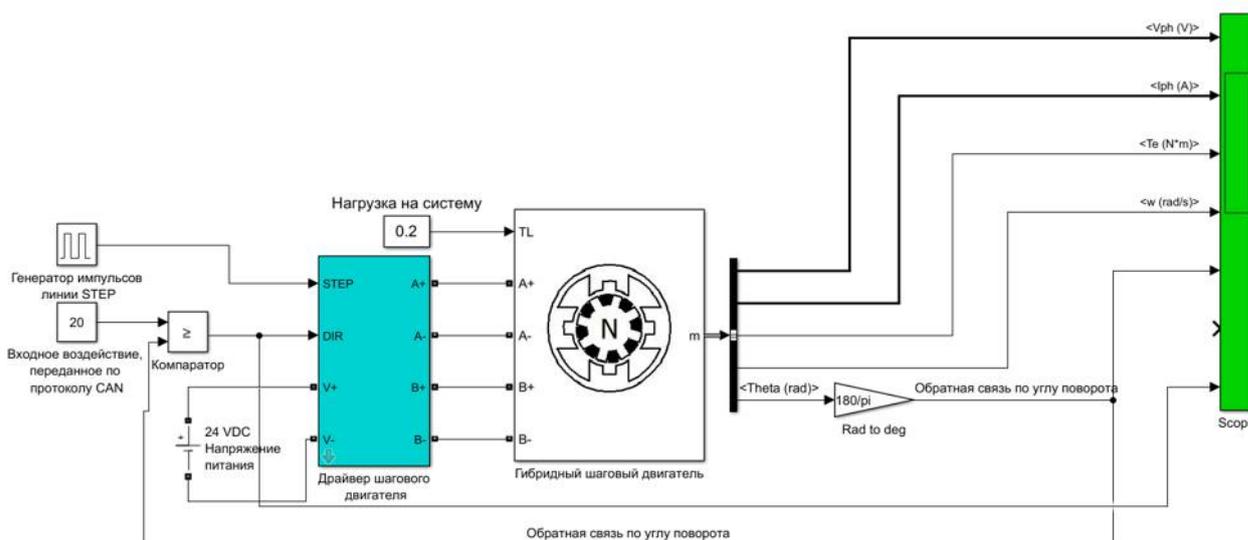


Рисунок 2.19. Модель замкнутой системы в Matlab Simulink

Результаты моделирования приведены на рисунке 2.20.

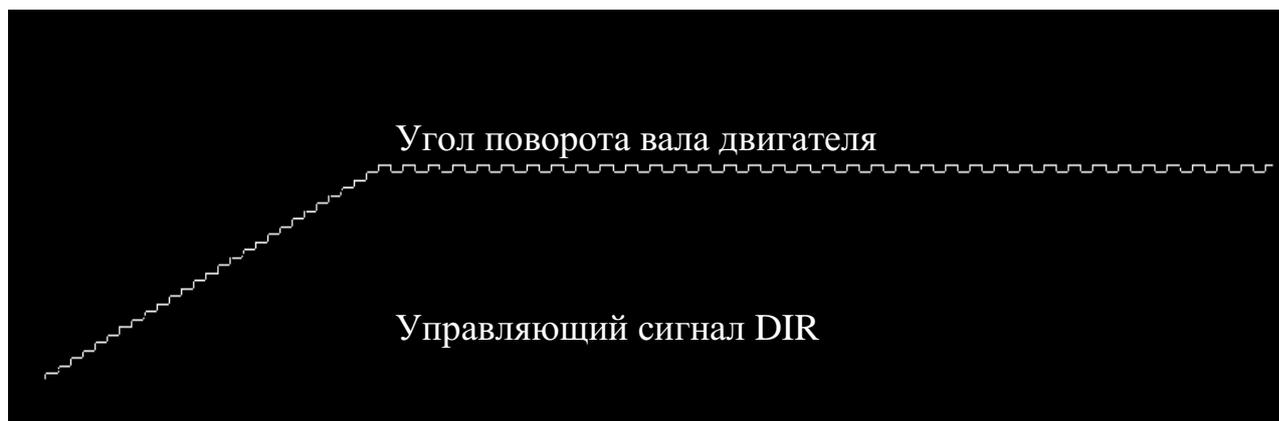


Рисунок 2.20. Результаты моделирования системы в Matlab Simulink

Принцип работы модели является следующим. Драйвер шагового двигателя, содержащий в себе контуры регулирования, имеет 2 входа управления: STEP и DIR. Управляющий сигнал STEP отвечает за пройденное расстояние. Каждый импульс на этом входе служит командой для поворота вала шагового двигателя на 1 шаг.

Управляющий сигнал DIR отвечает за направление вращения вала двигателя. Если на вход подана логическая «1», то вал вращается в прямом направлении, если подан логический «0», вал вращается в обратном направлении.

На вход модели подается константа, обозначающая требуемый угол поворота в градусах. Далее сигнал поступает на компаратор. Пока величина на входе компаратора 1 (верхний вход, см рисунок 2.19) больше или равна величине на входе компаратора 2 (нижний вход, см рисунок 2.19) на выход компаратора подается логическая единица. Двигатель будет вращаться в прямом направлении, так как выход компаратора соединен с входной линией DIR. Соответственно, если величина на входе 1 будет меньше, чем величина на входе 2, на выход компаратора будет подан логический ноль. Двигатель будет вращаться в обратном направлении. Также на вход модели подается сигнал тактового генератора с периодом следования импульсов 0.01 секунд. Каждый импульс, поданный на линию драйвера STEP сдвигает вал двигателя на 1 шаг. Время моделирования составляет 1 секунду. При моделировании примем нагрузку на систему равной максимально допустимой.

На графике (см. рисунок 2.20) видно, что каждые 0,01 секунду угол поворота увеличивается на величину одного шага, до достижения требуемой величины в 100 градусов, заданных на входе системы константой.

По достижении требуемого угла поворота шаговый двигатель не отключается, а начинает совершать по одному шагу в прямом и в обратном направлении. Это связано с необходимостью жёсткого позиционирования линейного модуля в требуемой координате.

## 2.5 Протокол связи мехатронной системы привода движения подачи

В модернизированной системе MC МК6033 связь программируемого логического контроллера с мехатронной системой привода подачи реализуется использованием протокола связи CAN.

CAN (англ. Control Area Network – область, охваченная сетью контроллеров) представляет собой комплекс стандартов для построения распределенных промышленных сетей, который использует последовательную передачу данных в реальном времени с очень высокой степенью надежности и защищенности.

Сообщения в CAN передаются с помощью фреймов (блоков данных). Используются два разных формата фреймов, которые различаются длиной поля идентификатора: стандартный фрейм с идентификатором длиной 11 бит и расширенный фрейм с длиной идентификатора 29 бит.

Существует 4 различных типа фреймов:

1. DATA FRAME – «фрейм данных» – переносит данные от передатчика к приемнику;

2. REMOTE FRAME – «дистанционный фрейм» (фрейм вызова) – передается одним из устройств для того, чтобы получить от другого устройства данные в формате DATA FRAME с тем же идентификатором, что и в REMOTE FRAME;

3. ERROR FRAME – «фрейм ошибок» – передается любым устройством, обнаружившим ошибку на шине;

4. OVERLOAD FRAME – «фрейм перегрузки» – используется для запроса дополнительной задержки между предыдущими и последующими данными.

Фрейм данных состоит из следующих полей, рисунок 2.21.



Рисунок 2.21. Структура фрейма данных CAN-интерфейса

1. Начало фрейма (Start Of Frame). Кодирован одним доминантным битом. Все устройства сети одновременно синхронизируют свои приемники по переднему фронту импульса этого бита;

2. Поле арбитража (Arbitration Field);

3. Поле контроля (Control Field). Включает в себя код, который указывает длину данных в поле данных;

4. Поле данных (Data Field). Передает информацию во фрейме данных, может иметь длину от 0 до 8 бит;

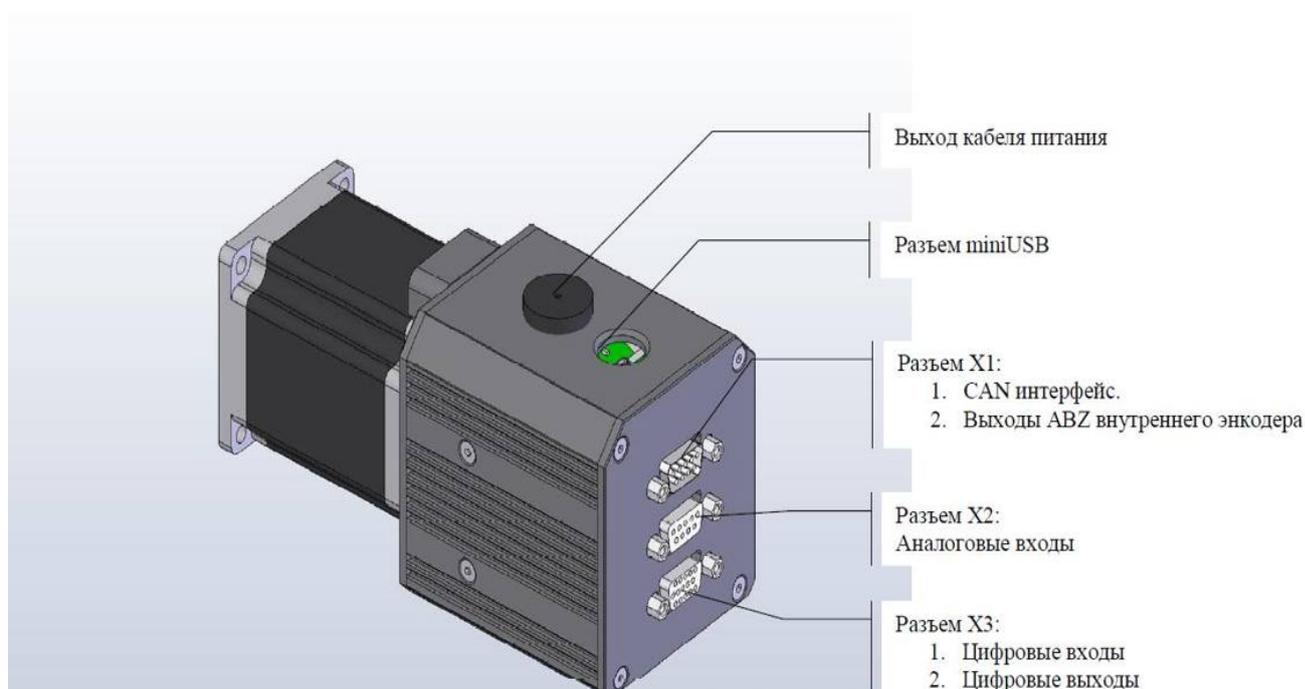
5. Поле циклического избыточного кода (CRC Field). Содержит циклический избыточный код, служащий для обнаружения ошибок во всех предшествующих ему полях фрейма, включая бит начала фрейма;

6. Поле уведомления о приеме (Acknowledgement Field). Передающее устройство в этом поле посылает два рецессивных бита. Принимающее устройство отвечает доминантным битом, если сообщение принято без ошибок;

7. Поле конца фрейма (End Of Frame) Представляет собой последовательность из семи рецессивных бит.

## 2.6 Подключение мехатронного модуля движения подачи

Общий вид интегрированного сервопривода СПШ20-34080 с указанием всех разъемов приведен на рисунке 2.22.



Разъем X1 сервопривода СПШ20-34080 служит для подключения промышленного интерфейса CAN. Состав и описание сигналов разъёма X1 приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Таблица сигналов разъема X1

Номер контакта	Наименование сигнала	Описание
1	Z+	Квадратурный прямой выход датчика позиции. Канал Z.
2	CANL	Сигнал шины CAN, низкий уровень в доминантном состоянии. Сигналы CANL и CANH образуют дифференциальную пару сигналов.
3	Z-	Квадратурный инверсный выход датчика позиции. Канал Z.
4	B+	Квадратурный прямой выход датчика позиции. Канал B.
5	B-	Квадратурный инверсный выход датчика канала B.
6	GND	Общий провод устройства.
7	CANH	Сигнал шины CAN, высокий уровень в доминантном состоянии. Сигналы CANL и CANH образуют дифференциальную пару сигналов.
8	A+	Квадратурный прямой выход датчика позиции. Канал A.
9	A-	Квадратурный инверсный выход датчика позиции. Канал A.

По шине CAN передается информация о текущей скорости и угловом положении вала двигателя, входящего в состав сервопривода.

Разъем X2 используется для подключения аналоговых сигналов. В состав интерфейсов сервопривода СПШ20-34080 входят два канала аналогового ввода. Интерфейс предназначен для подключения аналоговых устройств пользователя. Входная часть схемы содержит дифференциальный усилитель. Управляющее воздействие пропорционально разности сигналов на прямом и инверсном входах. Постоянное смещение, а также синфазные помехи, одновременно поступающие на прямой и инверсный вход, взаимно компенсируются, если только не выходят за рамки допустимой величины. Для работы в линейной области, максимальный размах алгебраической суммы входных напряжений с учётом помех и синфазного смещения не должен выходить за границы  $\pm 10$  В. Схема входной цепи включает защиту от перенапряжений. Описание сигналов разъема X2 приведено в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Таблица сигналов разъема X2

Номер контакта	Наименование сигнала	Описание
1	GND	Общий провод устройства.
2	AIN0+	Канал 0-го аналогового входа. Не инвертирующий вход.
3	GND	Общий провод устройства.
4	AIN1+	Канал 1-го аналогового входа. Не инвертирующий вход.
5	Shield	Экран.
6	AIN0-	Канал 0-го аналогового входа. Инвертирующий вход.
7	GND	Общий провод устройства.
8	AIN1-	Канал 1-го аналогового входа. Инвертирующий вход.
9	—	Не используется.

Схема входных цепей аналогового канала показана на рисунке 2.23.

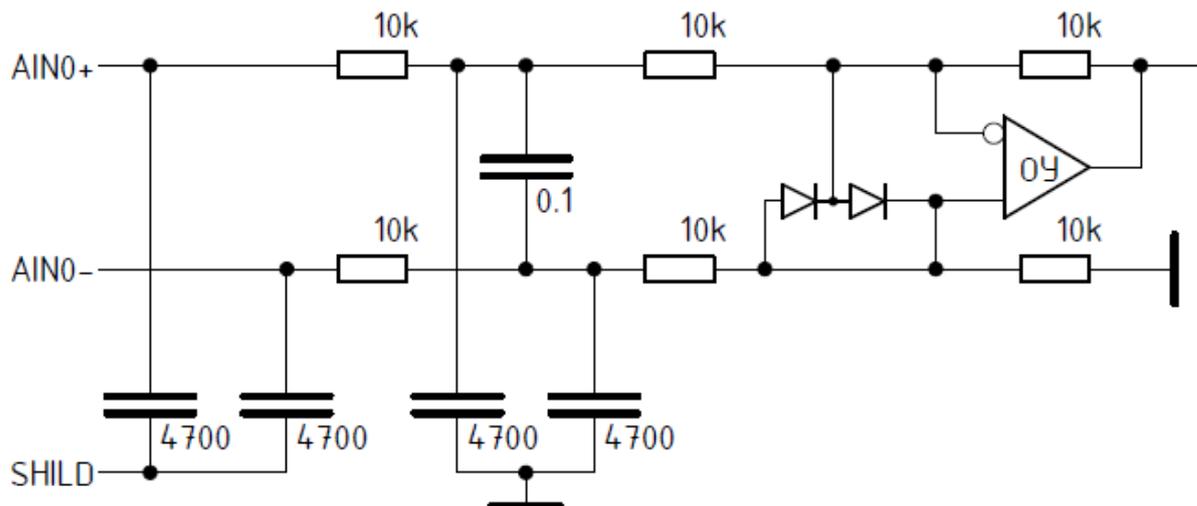


Рисунок 2.23. Входная цепь аналогового входа разъема X2

Разъем X3 используется для ввода/вывода цифровых сигналов. Данный разъем также используется для подключения концевых выключателей модуля линейных перемещений СТМТ-1. Данный разъем служит для приема сигналов интерфейса Step/Dir, с помощью которых задается позиция вала двигателя. Описание сигналов разъема X2 приведено в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Таблица сигналов разъема X3

Номер контакта	Наименование сигнала	Описание
1	IN0+	Канал 0-го дискретного входа/Сигнал Step. Линия вытекающего тока.
2	IN1+	Канал 1-го дискретного входа/Сигнал Dir. Линия вытекающего тока.
3	IN2+	Канал 2-го дискретного входа. Линия вытекающего тока.
4	IN3+	Канал 3-го дискретного входа. Линия вытекающего тока.
5	GND	Общий провод устройства. Гальванической развязки не имеет.

Продолжение таблицы 2.9

6	Shield	Экран. Не подключен.
7	IN0–	Канал 0-го дискретного выхода/Сигнал Step. Линия втекающего тока.
8	IN1–	Канал 1-го дискретного входа/Сигнал Dir. Линия втекающего тока.
9	IN2–	Канал 2-го дискретного входа. Линия втекающего тока.
10	IN3–	Канал 3-го дискретного входа. Линия втекающего тока.
11	OUT0–	Канал 0-го дискретного выхода. Линия втекающего тока.
12	OUT0+	Канал 0-го дискретного выхода. Линия втекающего тока.
13	OUT1–	Канал 1-го дискретного выхода. Линия втекающего тока.
14	OUT1+	Канал 1-го дискретного выхода. Линия втекающего тока.
15	+5VIO	Выход стабилизатора +5 В. Гальванической развязки не имеет.

Параметры входных портов: напряжение от 5 до 24 В, ток потребления не более 10 мА. За счет наличия в приводе схемы стабилизации тока, использовать внешний резистор не обязательно.

Параметры выходных портов: напряжение от 5 до 24 В, нагрузочная способность не более 200 мА.

На рисунке 2.24 показаны упрощённые схемы интерфейсов (а, б) и примеры типовых включений (в, г, д, е).

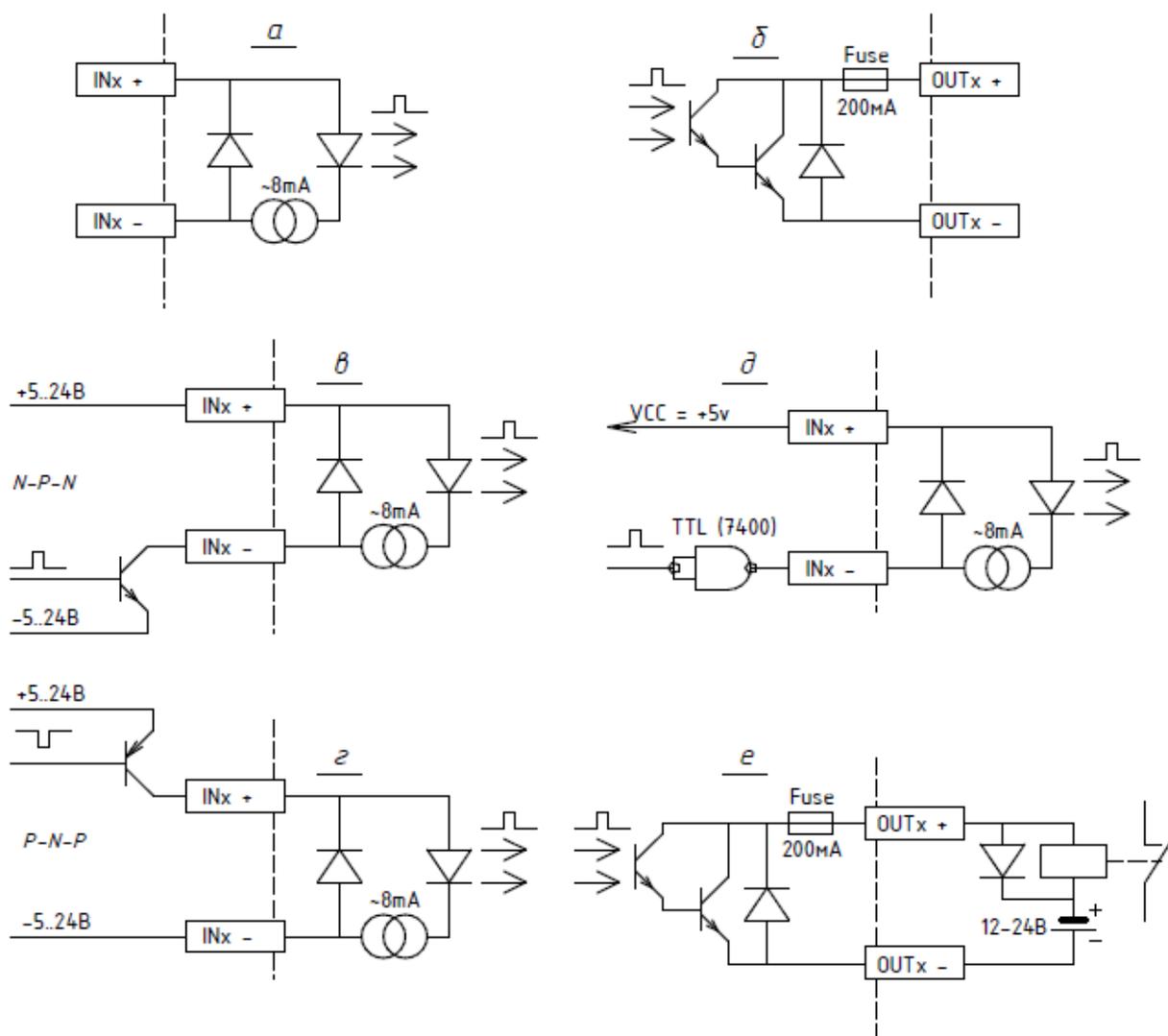


Рисунок 2.24. Схема интерфейсов разъема X3

При подключении к дискретным входам сервопривода СПШ20-34080 внешних устройств (в МС МК6033 к сервоприводу подключаются концевые выключатели модуля линейных перемещений СТМТ-1) недостатком является отсутствие гальванической развязки между внешним оборудованием и внутренней электроникой сервопривода. По этой причине необходимо обеспечивать защиту соединительных проводов от попадания на них высокочастотных помех. Более надежным способом является использование внешнего источника стабилизированного напряжения. при подключении внешних устройств, рисунок 2.25.

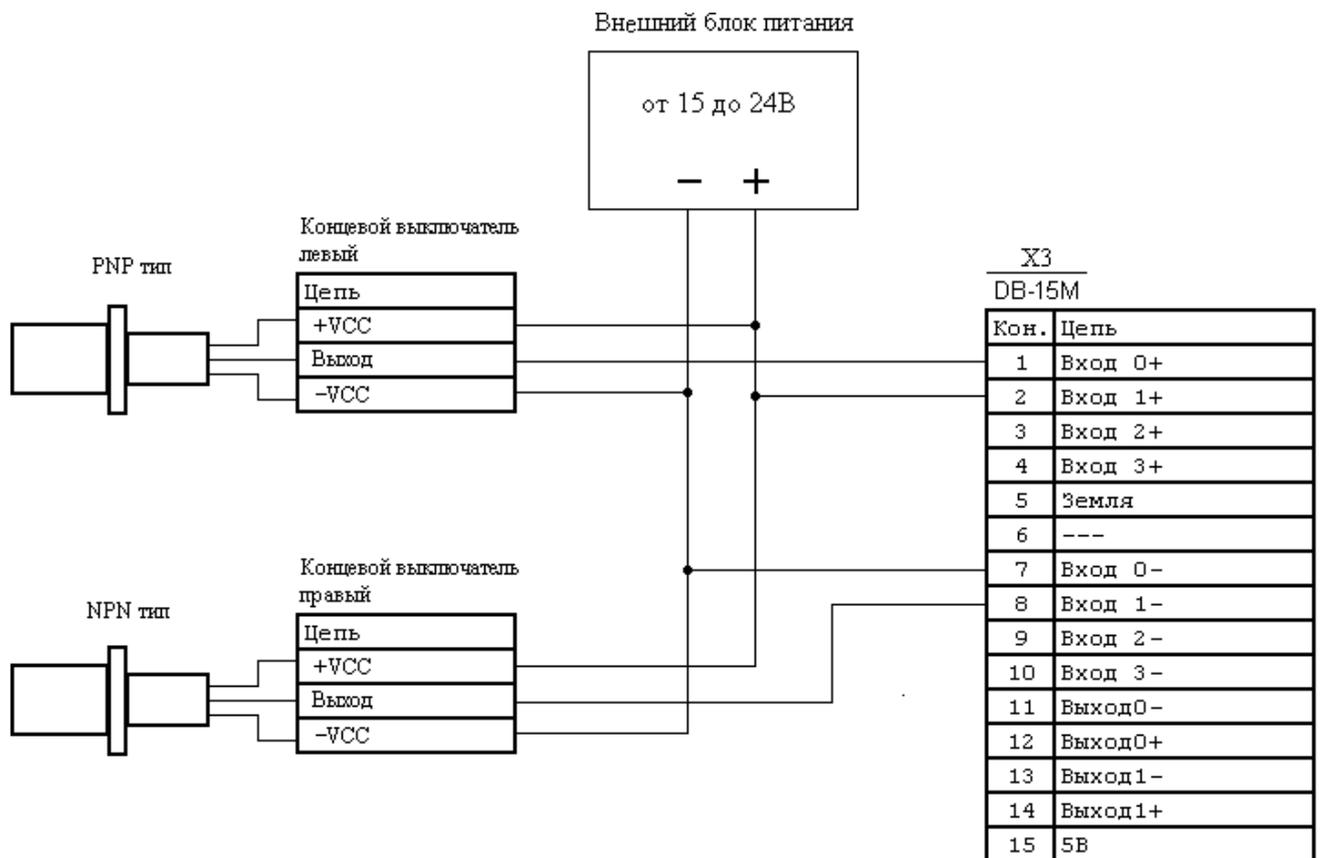


Рисунок 2.25. Схема подключение концевых выключателей

## 2.7 Программирование и настройка внутреннего ПЛК мехатронного модуля линейных перемещений

Программирование внутреннего программируемого логического контроллера сервопривода СПШ20-34080 осуществляется при помощи программной среды «МотоМастер». Данная программа предназначена для настройки сервопривода и разработки программ движения. С помощью программы «МотоМастер» можно выполнить следующие действия:

- просмотр и редактирование параметров привода и режимов его работы;
- ручное управление сервоприводом;
- разработка и отладка программ для программируемого логического контроллера привода;
- анализ динамических процессов, протекающих в приводе в режиме реального времени.

Схема взаимодействия программной среды «МотоМастер» и внутреннего программируемого логического контроллера сервопривода приведена на рисунке 2.26.



Рисунок 2.26. Взаимодействие программы «МотоМастер» и встроенного ПЛК сервопривода

В энергонезависимой памяти системы управления привода может храниться до 8 пользовательских программ. При этом в процессе отработки при необходимости ПЛК может переходить от выполнения одной программы к другой. Разработка программ для внутреннего ПЛК выполняется на языке SML (Servo Motor Language), разработанного компанией ЗАО «Сервотехника» специально для сервоприводов СПШ. Пример простой программы для управления работой сервопривода приведен в таблице 2.10.

Таблица 2.10. Пример кода программы «МотоМастер»

Код программы «МотоМастер»	Комментарии
X=1000	Инициализация переменной.
Y=100	Инициализация переменной.
W=X,A=Y	Задание скорости вращения и ускорения.
X=X-100	-
WAIT(W>X)	Ожидание выхода на требуемую скорость.
W=0	Прекратить вращение.
WAIT(W<5)	Ожидание завершения вращения.
REPEAT	Повторить программу сначала.

Результат отработки программы представлен на рисунке 2.27 в виде графика изменения скорости вращения вала двигателя сервопривода, представленном на эмуляторе осциллографа программы «МотоМастер».

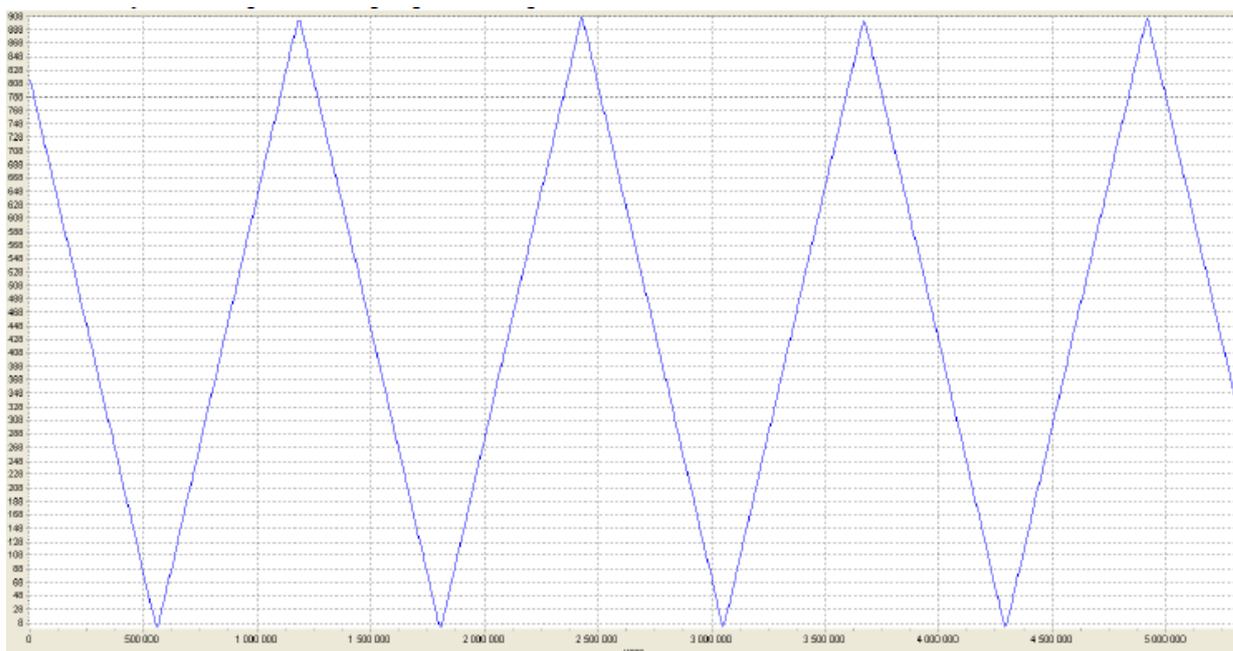


Рисунок 2.27. График изменения скорости при отработке программы

В программе «МотоМастер» реализован режим ручного управления сервоприводом, рисунок 2.28.

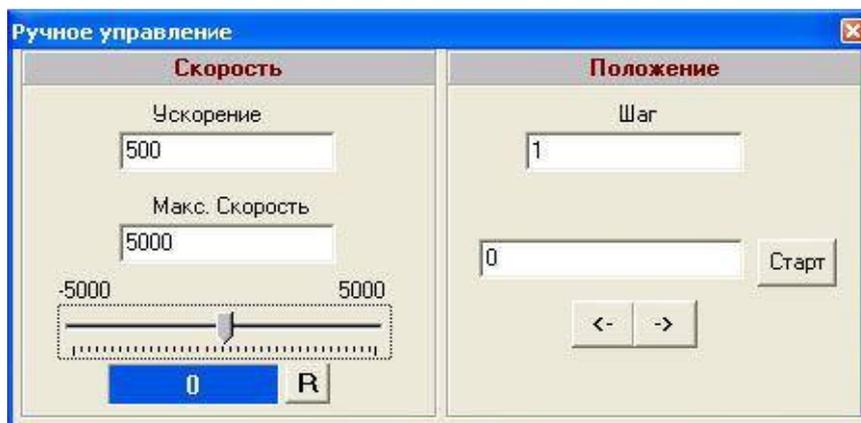


Рисунок 2.28. Интерфейс ручного управления сервоприводом

Настройка параметров контуров регулирования замкнутой системы сервопривода также осуществляется путем изменения настроек встроенного ПЛК в программе «МотоМастер»

### 3 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МС МК6033

Абразивный инструмент станка МК6033 установлен на шпиндельную головку шпиндельного узла ХТ30 фирмы JNYO [13], см. рисунок 1.2. Внешний вид шпиндельного узла показан на рисунке 3.1, характеристик приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.1. Шпиндельный узел ХТ30

Таблица 3.1. Характеристики шпиндельного узла ХТ30

Мощность, кВт	2,2
Напряжение, В	380
Тип встроенного электродвигателя	Асинхронный, трехфазный
Класс защиты	IP54
Обороты, об/мин	3000
Номинальный момент, Н·м	3,7–21,8

Шпиндельный узел ХТ30 является изначальным исполнительным элементом модернизируемого станка. Использование ХТ30 в МС МК6033 обусловлено требованиями заказчика ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ».

Задача модернизации привода главного движения связана с решением задачи управления скоростью вращения абразивного инструмента. Необходимо внедрить в МС МК6033 оборудование, позволяющее управлять скоростью вращения трехфазного асинхронного двигателя, входящего в шпиндельный узел ХТ30.

Управление скоростью встроенного асинхронного двигателя шпиндельного узла ХТ30 может осуществляться при помощи частотного преобразователя. Частотный преобразователь – это электротехническое устройство, используемое для управления скоростью и моментом двигателей переменного тока путем изменения частоты и напряжения питания электродвигателя.

### 3.1 Выбор частотного преобразователя

Выбор частотного преобразователя осуществляется исходя из следующих требований:

- мощность – не менее 2 кВт;
- напряжение питания – 3 фазы, 380 В;
- число выходных фаз – 3 фазы;
- возможность связи с ПЛК.

Выдвигаемым требованиям полностью удовлетворяет частотный преобразователь VFD037EL43A фирмы Delta [14]. Характеристики устройства приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Характеристики ПЧ Delta VFD037EL43A

Напряжение питания, В	380
Частота питающей сети, Гц	47...63
Номинальный входной ток, А	8,2

Продолжение таблицы 3.2

Выходное напряжение, В	От 0 до 380
Ток предохранителя или автоматического выключателя (тип В), А	20 А
Номинальная мощность двигателя, кВт	3,7
Число входных фаз	3
Число выходных фаз	3
Выходная частота, Гц	От 0,1 до 600
Разрешение выходной частоты, Гц	0,01
Пропускаемые частоты	3 зоны; от 0,1 до 600 Гц
Метод управления	SPWM (синусоидальная ШИМ)
Характеристики момента	Пусковой момент: 150% на 5,0 Гц
Уровень токоограничения	От 20 до 250% от номинального тока
Протокол связи с ПЛК	Modbus RTU

Внешний вид частотного преобразователя представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2. Преобразователь частоты Delta

Схема соединений частотного преобразователя Delta VFD037EL43A, содержащая в себе рекомендации производителя по установке и подключению устройства представлена на рисунке 3.3.

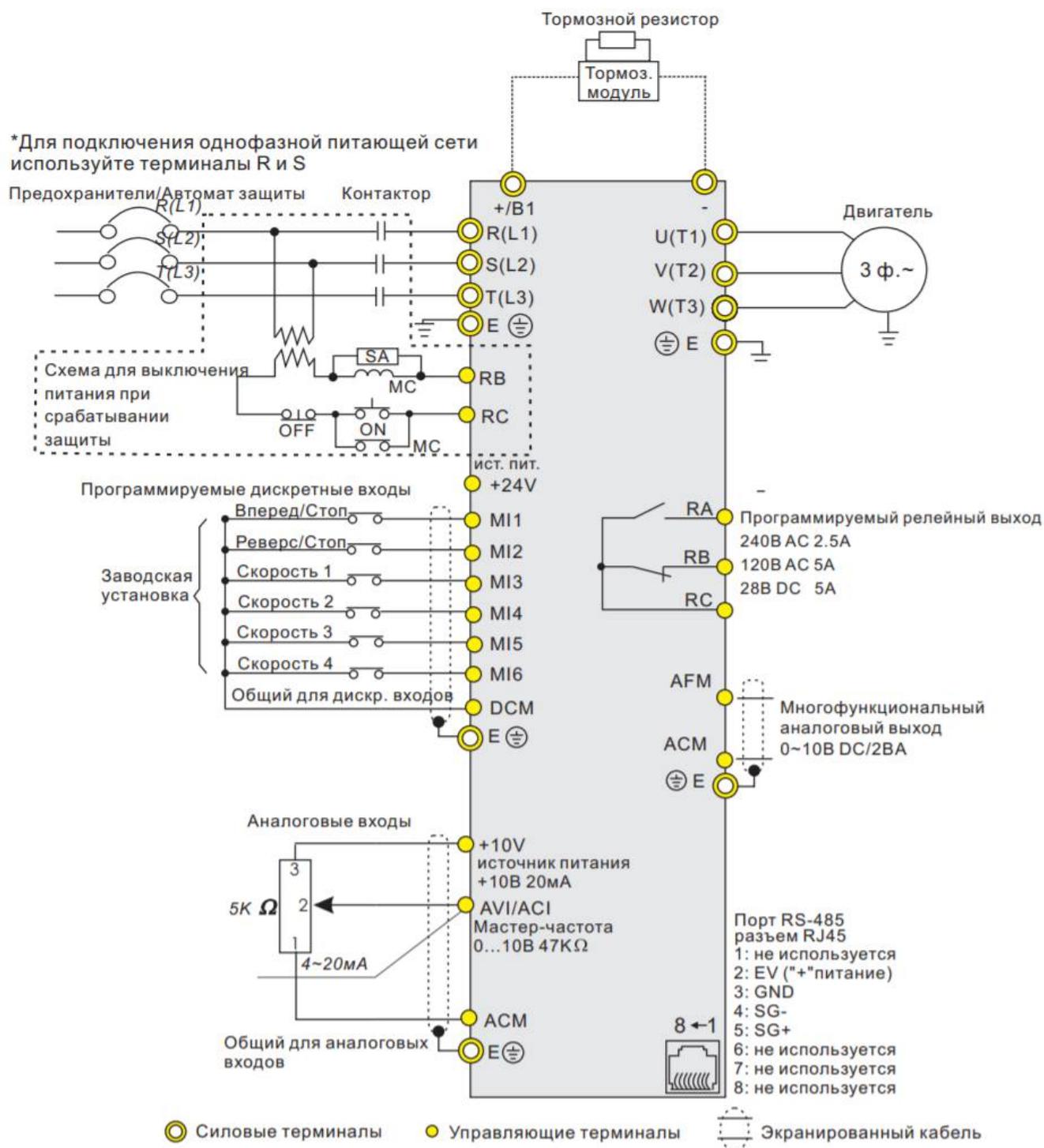


Рисунок 3.3. Схема соединений ПЧ Delta VFD037EL43A

Исходя из схемы соединений частотного преобразователя (см. рисунок 3.3) на линиях питающего напряжения L1, L2 и L3 необходима установка показана трехфазного автомата защиты. Произведем выбор трехфазного автомата исходя из следующих требований:

- 3 фазы;
- ручное переключение;
- номинальный ток срабатывания 10 А;
- номинальное напряжение 380 В.

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет трехфазный автоматический выключатель 11029DEK фирмы Schneider DEKraft [15].

Внешний вид показан на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. Автоматический выключатель 11029DEK

Характеристики устройства приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Характеристики элемента QF4

Номинальный ток, А	10
Номинальное напряжение, В	400
Количество силовых полюсов	3
Частота, Гц	50

На схеме соединений частотного преобразователя (см. рисунок 3.3) присутствует схема для выключения питания при срабатывании защиты. Данная схема

может быть реализована с использованием четырехфазного контактора. Выбор реального элемента выполнен, исходя из следующих требований:

- 4 фазы;
- ручное переключение;
- номинальный ток – до 16 А;
- номинальное напряжение – 380 В;

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет четырехфазный контактор (катушка управления) E LC1E1210M5 фирмы Schneider Electric [16].

Внешний вид показан на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5. Четырехфазный контактор E LC1E1210M5

Характеристики контактора E LC1E1210M5 приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Характеристики элемента KM1

Номинальный ток, А	16
Номинальное напряжение, В	400
Количество силовых НО контактов	3
Количество силовых полюсов	3
Количество НО контактов	1
Частота, Гц	50

### 3.2 Протокол связи мехатронной системы главного движения

Мехатронная система главного движения включает в себя:

1. Шпиндельный узел ХТ30 с встроенным трехфазным асинхронным двигателем.
2. Частотный преобразователь Delta VFD037EL43A, обеспечивающий управления скоростью вращения привода главного движения.

Связь мехатронной системы главного движения и программируемого логического контроллера, управляющего работой модернизированной системы реализуется с использованием протокола связи Modbus [17].

Modbus – открытый коммуникационный протокол, основанный на архитектуре ведущий-ведомый (MASTER-SLAVE), рисунок 3.6. Modbus широко применяется в промышленности для организации связи между электронными устройствами.

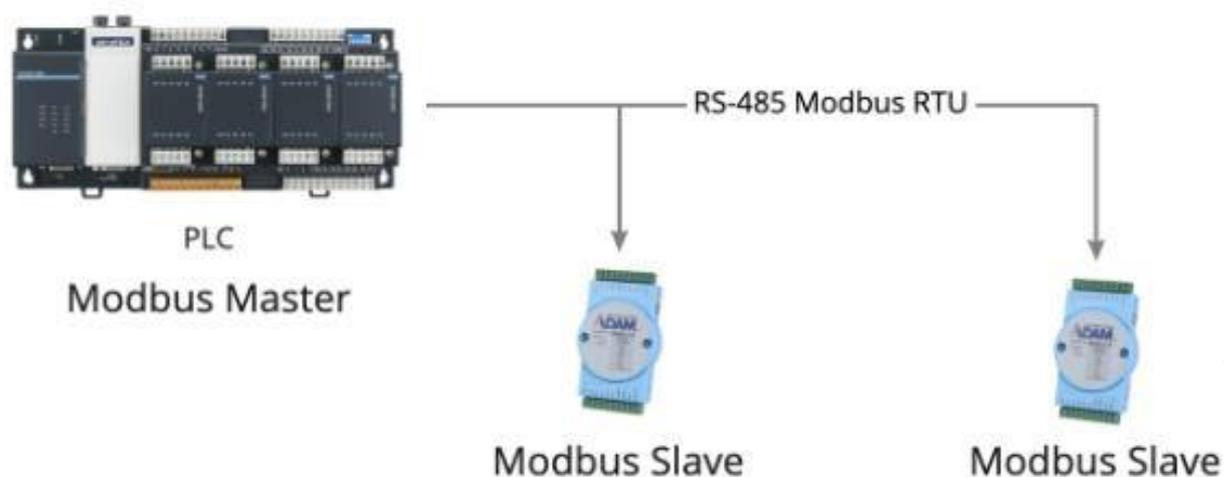


Рисунок 3.6. Схема архитектуры ведущий-ведомый

В модели ведущий-ведомый главное устройство (ведущее устройство, англ. MASTER) осуществляет однонаправленное управление подчинённым (ведомым, англ. SLAVE) устройством или группой устройств.

Протокол Modbus предполагает, что только одно ведущее устройство (контроллер) и до 247 ведомых (модулей ввода-вывода) могут быть объединены в промышленную сеть. Обмен данными всегда инициируется ведущим устройством. Ведомые устройства никогда не начинают передачу данных, пока не получают запрос от

ведущего. Ведомые устройства также не могут обмениваться данными друг с другом. Поэтому в любой момент времени в сети Modbus может происходить только один акт обмена.

Адреса с 1 по 247 являются адресами Modbus-устройств в сети, адреса с 248 по 255 зарезервированы. Ведущее устройство не должно иметь адреса и в сети не должно быть двух устройств с одинаковыми адресами.

Ведущее устройство может посылать запросы всем устройствам одновременно (широковещательный режим) или только одному. Для широковещательного режима зарезервирован адрес «0» (при использовании в команде этого адреса она принимается всеми устройствами сети).

В модернизированной системе МС МК6033 ведущим устройством (MASTER) является программируемый логический контроллер, а ведомым устройством (SLAVE) является частотный преобразователь.

Протокол Modbus имеет два режима передачи: RTU (англ. Remote Terminal Unit – удаленное терминальное устройство) и ASCII. Стандарт предусматривает, что режим RTU в протоколе Modbus должен присутствовать обязательно, а режим ASCII является опциональным. Пользователь может выбирать любой из них, но все модули, включенные в сеть Modbus, должны иметь один и тот же режим передачи. В модернизированной системе МСМК6033 для связи мехатронной системы главного движения и программируемого логического контроллера использован режим передачи RTU, процесс настройки будет рассмотрен далее.

Сообщения Modbus RTU передаются в виде кадров, для каждого из которых известно начало и конец. Признаком начала кадра является пауза (тишина) продолжительностью не менее 3,5 шестнадцатеричных символов (14 бит). Кадр должен передаваться непрерывно. Если при передаче кадра обнаруживается пауза продолжительностью более 1,5 шестнадцатеричных символа (6 бит), то считается, что кадр содержит ошибку и должен быть отклонен принимающим модулем.

Схема кадра передачи в Modbus RTU представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7. Кадр передачи в Modbus RTU

Коммуникационный порт Modbus RTU реализуется в виде разъема RJ-45, рисунок 3.8.

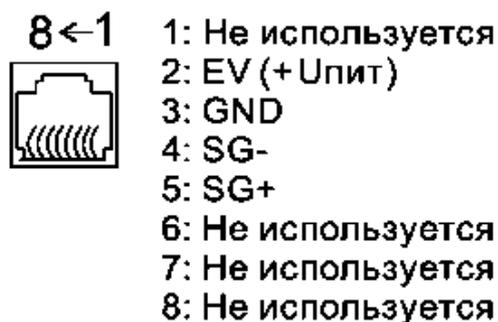


Рисунок 3.8. Разъем RJ-45

Настройки протокола обмена частотного преобразователя и ПЛК проведены согласно указаниям производителя оборудования [14]. Необходимо произвести настройку следующих параметров при помощи специальных команд. Команды разделены на 11 групп согласно своему назначению. Номер команды записывается в формате XX.XX, где первые два символа – номер группы, последние два символа – номер команды. Необходимо произвести настройку параметров группы номер 9, отвечающей за параметры коммуникации ПЧ. Список команд, которые подлежат настройке представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Параметры коммуникации ПЧ подлежащие настройке

Параметр	Описание	Значения	Установка
09.00	Коммуникационный адрес ПЧ	1-254	1
09.00	Скорость передачи	0: 4800 бит/с 1: 9600 бит/с 3: 19200 бит/с 4: 38400 бит/с	1
09.04	Протокол коммуникации	0: Modbus, ASCII 1: Modbus, RTU	1

Ввод осуществляется с панели управления частотного преобразователя, рисунок 3.9.



Рисунок 3.9. Панель управления ПЧ

На панели присутствуют следующие элементы управления:

1. Дисплей состояния, индикация состояния привода;
2. LED-дисплей, индикация параметров системы;
3. Потенциометр, задание частоты;
4. Кнопка RUN, пуск привода;
5. Кнопки UP и DOWN, выбор параметра и регулировка его значения;
6. Кнопка MODE, переключение между режимами индикации LED-дисплея;

7. Кнопка SET/RESET, останов привода и сброс аварийной блокировки;

8. Кнопка ENTER, ввод параметра.

Фрагмент таблицы адресов команд протокола Modbus приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Адреса команд Modbus

2000H	Bit 0-1	00B: нет функции
		01B: Stop (пуск двигателя)
		10B: Run (останов двигателя)
		11B: Jog+Run
	Bit 2-3	не используется
	Bit 4-5	00B: нет функции
		01B: FWD (прямой ход)
		10B: REV (обратный ход)
		11B: Изменение направления вращения
	Bit 6-7	00B: Выбор времени 1 разгона/торможения
		01B: Выбор времени 1 разгона/торможения
	Bit 8-15	не используется
	2001H	Заданная частота (команда ввода)
2102H	Заданная частота (запрос текущего параметра)	
2103H	Заданная частота (запрос текущего реального значения)	
2104H	Значение выходного тока (запрос)	
2109H	Значение выходного напряжения (запрос)	

Настройка параметров коммуникации частотного преобразователя необходима для корректной передачи команд управления по протоколу Modbus от ведущего устройства.

## 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МС МК6033

### 4.1 Постановка требований к рабочему месту оператора МС МК6033

Согласно требованиям заказчика проекта по модернизации сферотокарного станка МК6033 ОАО ПГ «Урал-АРМ», рабочее место оператора МС МК6033 должно быть оснащено:

- НМІ-панелью;
- пультом ручного управления.

Управление системой должно осуществляться с помощью программируемого логического контроллера, НМІ-панели и подключённого к ПЛК пульта управления.

На рисунке 4.1 приведена структурная схема МС МК6033.

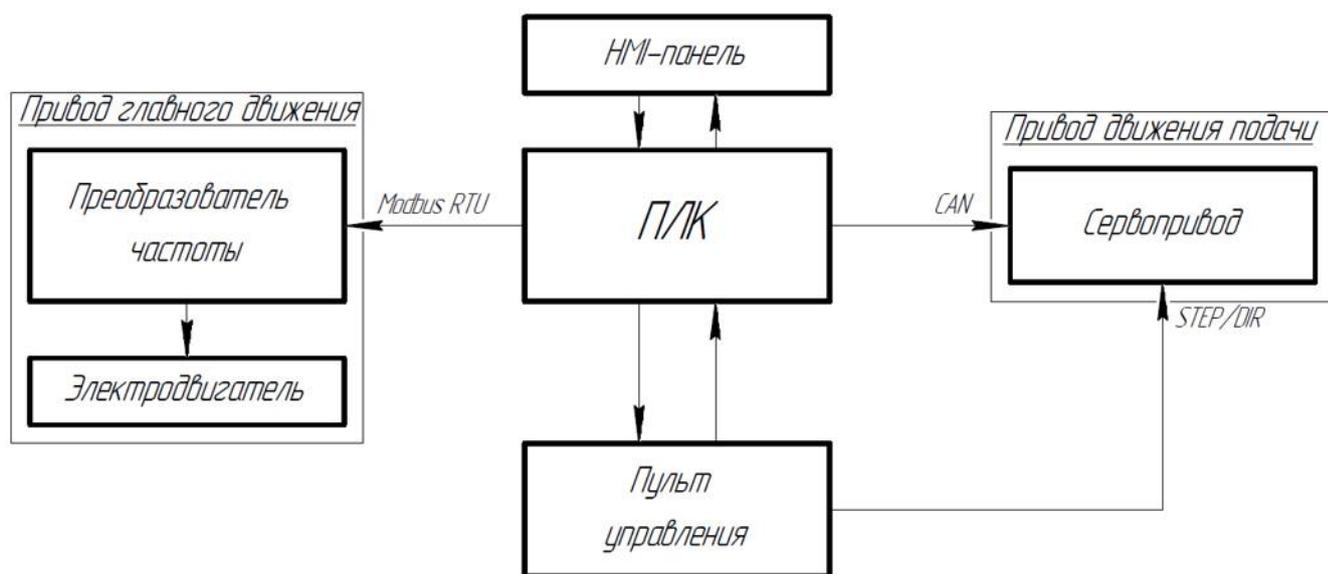


Рисунок 4.1. Структурная схема МС МК6033

Внутри системы используются следующие протоколы связи:

– Modbus RTU для связи с частотным преобразователем привода главного движения;

– CAN для связи со встроенным ПЛК привода движения подачи;

– STEP/DIR для связи пульта управления и привода движения подачи.

Кнопки пульта управления подключаются к дискретным входам ПЛК.

## 4.2 Выбор программируемого логического контроллера

Выбор программируемого логического контроллера должен осуществляться исходя из следующих требований:

- поддержка протокола связи RS-485 Modbus;
- наличие шины CAN;
- наличие дискретных входов;
- иметь возможность связи с ПК через Ethernet [18];
- наличие встроенной сенсорной HMI-панели.

Сформулированным требованиям удовлетворяет панельный программируемый логический контроллер DC2007 фирмы Berghof [19]. Внешний вид ПЛК DC2007 представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – ПЛК DC2007 Berghof

Технические характеристики DC2007 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Характеристики ПЛК DC2007 Berghof

Диагональ сенсорной панели	7"
Разрешение	800×480 пикселей, WVGA
Тип экрана	TFT, резистивный сенсорный
Количество цветов	16.7 млн.
Процессор	800 МГц, ARM® Cortex™-A9
Память программы (Flash)	256 Мб
Оперативная память (RAM)	256 Мб
Память Retain	100 КБ (FRAM)
Рабочий диапазон температур	0...55 °С
Напряжение питания	24 В
Потребляемый ток	мин. 0.3 А; макс. 3А в зависимости от нагрузки на входах и выходах
Ethernet	1 разъем RJ45
EtherCAT	1 разъем RJ45M
USB	1 порт USB типа А
CAN	1 шина CAN
Последовательные интерфейсы	Modbus RTU
Дискретные входы	4×PNP
Дискретные выходы	4×PNP (0.5 А)
Аналоговые входы	2×(-10...+10 В)

Исходя из требований к модернизируемой системе (см. пункт 1.3) ПЛК должен обеспечить подключение шести кнопок пульта управления. Линий дискретного ввода ПЛК DC2007 недостаточно, следовательно, необходимо расширить поле дискретного ввода путем подключения модуля дискретного ввода/вывода.

Для увеличения количества доступных портов дискретного ввода/вывода к ПЛК DC2007 подключается модуль расширения E-I/O DI16/DO16 фирмы Berghof [20].

Внешний вид E-I/O DI16/DO16 представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6. E-I/O DI16/DO16

Схема подключения модуля расширения показана на рисунке 4.7.

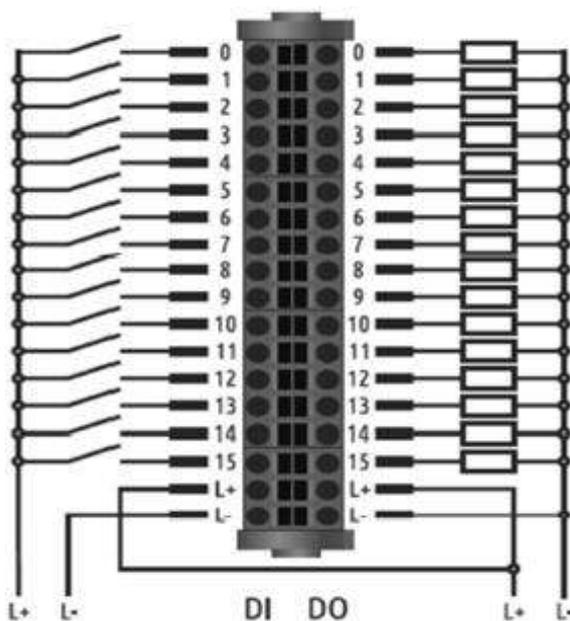


Рисунок 4.7. Схема подключения модуля расширения E-I/O

Характеристики модуля расширения E-I/O DI16/DO16 приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Характеристики модуля расширения

Подключение к контроллеру	По внутренней шине EtherCAT
Напряжение питания, В	24

Продолжение таблицы 4.2

Потребляемая мощность, Вт	3,6
Количество и тип дискретных входов	16PNP
Логический «0», В	-3...5
Логическая «1», В	15...30
Количество и тип дискретных выходов	16×PNP
Максимальный ток для одного выхода, мА	500
Общий максимальный ток, А	8

Согласно руководству к ПЛК DC2007 [19] подключение модулей расширения осуществляется с использованием сети EtherCAT [21].

EtherCAT – промышленная шина, основанная на сети Ethernet. Это открытая технология, стандартизированная Международной электротехнической комиссией [22].

Для удаленного подключения к ПЛК DC2007 модулей расширения с использованием шины EtherCAT, а также увеличения максимального количества модулей расширения, подключаемых к программируемому логическому контроллеру, применяется модуль-капLER E-I/O BUSKOUPLER 3A [23] см. рисунок 4.8.

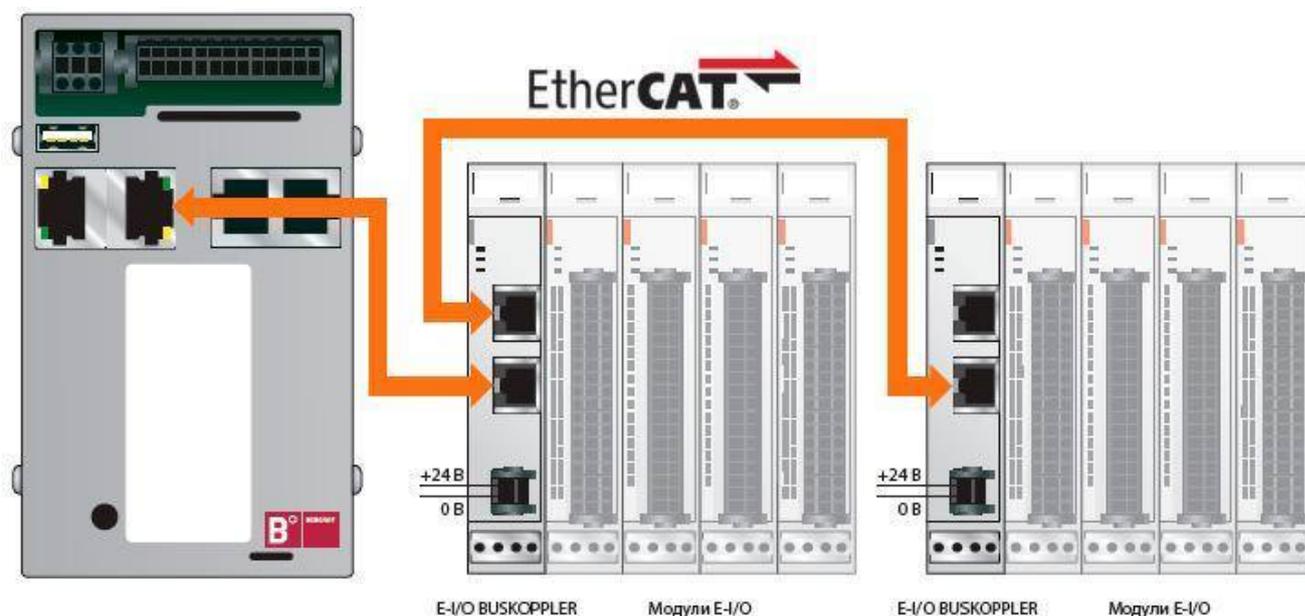


Рисунок 4.8. Подключение модулей расширения к ПЛК DC2007

Внешний вид модуля представлен на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9. E-I/O BUSKOUPLER

Характеристики E-I/O BUSKOUPLER приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Характеристики модуля-каплера

Напряжение питания, В	24
Потребляемая мощность модуля, Вт	4,68
Максимальная мощность подключаемых модулей, Вт	72
Максимальное количество модулей расширения по шине EtherCAT	20 (ток потребления не более 3 А)
Коммуникационные порты	1×EtherCAT разъем RJ45 (для предыдущего EtherCAT-устройства) 1×EtherCAT разъем RJ45 (для следующего EtherCAT-устройства)
Максимальная длина соединительного кабеля Ethernet (связь с ПЛК)	до 100 м

Для питания ПЛК DC2007 и подключаемых к нему модулей расширения необходим блок питания, соответствующий следующим параметрам:

- выходное напряжение 24 В;
- мощность 60 Вт.

Выдвигаемым требованиям полностью удовлетворяет блок питания DR-60W-24 PROxima фирмы EKF [24]. Характеристики выбранного блока питания приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Характеристики блока питания DR-60W-24 PROxima

Выходное напряжение, В	24
Максимальный выходной ток, А	2,5
Номинальное напряжение питания переменного тока АС 50 Гц, В	100...240
Тип питающего напряжения	АС (переменное)
Выходная мощность, Вт	60
Степень защиты	IP20

Внешний вид блока питания EKF DR-60W-24 PROxima показан на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10. Блок питания DR-60W-24

### 4.3 Выбор пульта управления

Выбор пульта ручного управления осуществлялся исходя из следующих требований:

- наличие встроенного генератора импульсов;
- наличие переключателей множителя импульсов;
- наличие шести кнопок для реализации дополнительных функций ручного управления;
- наличие встроенного маховичка для обеспечения подвода привода движения подачи в шаговом режиме;
- возможность управления приводом движения подачи с помощью протокола связи STEP/DIR.

Указанным выше требованиям соответствует пульт PL-MPG01 [25] фирмы Purelogic. На рисунке 4.11 показан внешний вид пульта ручного управления.



Рисунок 4.11. Пульт PL-MPG01 Purelogic

На рисунке 4.12 приведена схема подключения пульта ручного управления PL-MPG01.

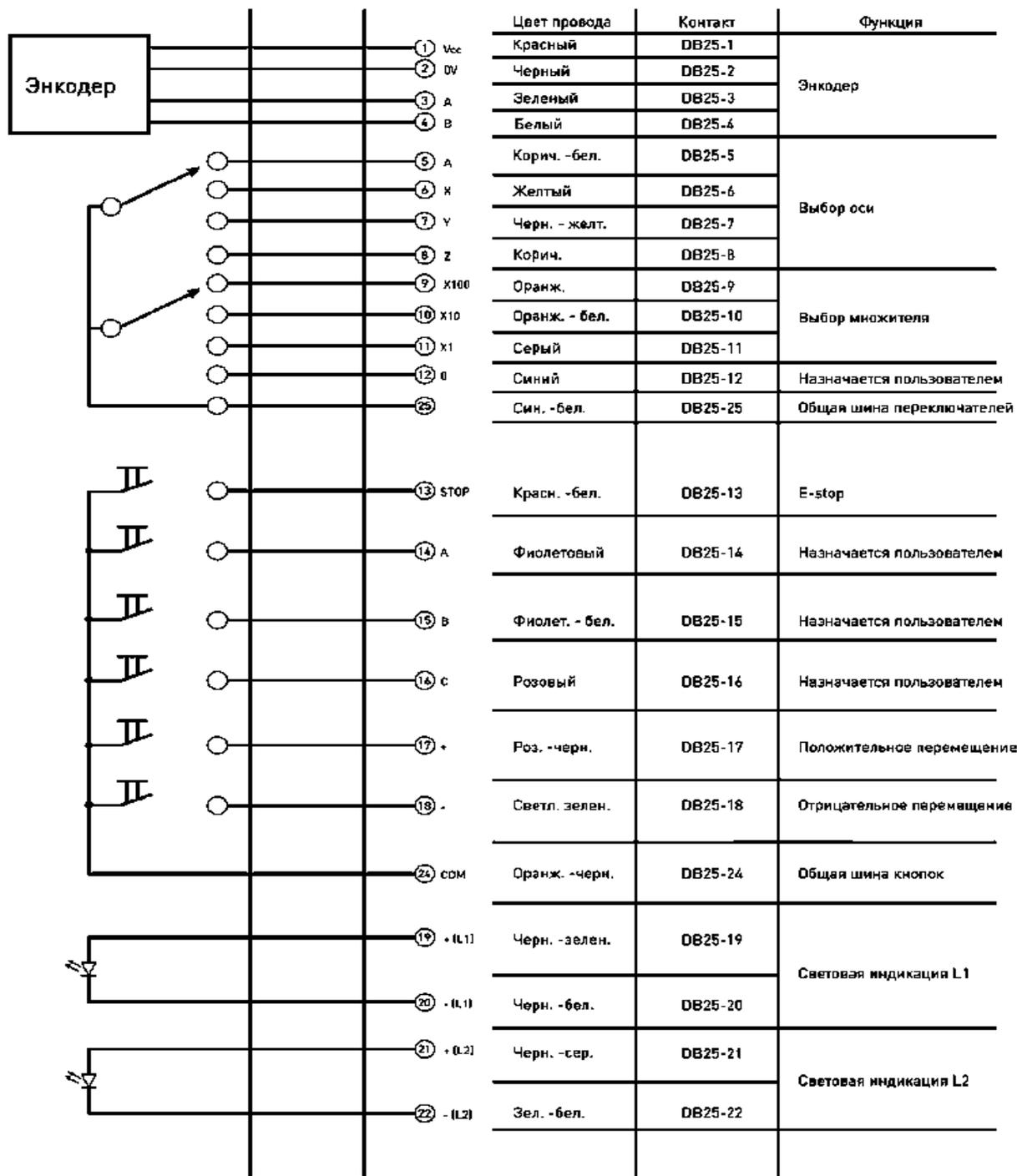


Рисунок 4.12. Подключение выводов пульта ручного управления

Использование кнопок «ПУСК», «СТОП», «Запомнить координату», «Отступить от координаты», «Подвод к координате», «Вывод привода в ноль» пульта ручного управления позволит реализовать дополнительные функции управления процессом сферотокарной обработки в ручном режиме.

## 5 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МС МК6033

Разработанная функциональная схема автоматизации МС МК6033 представлена в приложении В. В систему входят следующие исполнительные элементы (см. приложение А):

- электродвигатель 1 (М1);
- сервопривод (А5), включающий в себя встроенный ПЛК А5, 2 концевых выключателя SQ1 и SQ2, встроенный энкодер SR1, шаговый двигатель М2;
- электродвигатель 2 (М3).

В систему входят следующие элементы управления:

- ПЛК А1.
- пульт ручного управления А4.
- частотный преобразователь UZF1.

В приложении А представлена схема установки элементов автоматизации МС МК6033. Приборами, устанавливаемыми по месту, являются:

- электродвигатель М1;
- электродвигатель М2;
- электродвигатель М3;
- модуль линейного перемещения и сервопривод А5;
- пульт управления А4.

В шкаф автоматики устанавливаются:

- программируемый логический контроллер А1;
- частотный преобразователь UZF1;
- дополнительные модули ПЛК А3 и А2.

МС МК6033 использует следующие протоколы связи:

- протокол Ethernet: связь через модуль А2 с модулем дискретного ввода/вывода А3 (7 дискретных линий связи на А3).
- протокол CAN: связь с пультом управления А4;
- протокол Modbus: связь с частотным преобразователем UZF1.

## 6 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ МС МК6033

Электротехническая документация МС МК6033 представлена в приложении Б. Разработка проведена с использованием программного продукта EPLAN. Логотип EPLAN показан на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1. Логотип EPLAN

EPLAN предлагает неограниченные возможности для разработки эскизного проекта, разработки проектной документации и управления проектами автоматизации. Автоматическое создание документации – это интегрированный подход получения исчерпывающей документации и последующих фаз жизненного цикла проекта, таких как производство, монтаж, запуск и обслуживание. Инженерные данные всех частей проекта могут быть легко переданы посредством интерфейсов с программным обеспечением класса CAE (расчеты, автоматизированный подбор оборудования и т.д.). Этим обеспечивается целостность и интеграция в масштабах всего процесса разработки продукта.

### 6.1 Разработка схемы электрической принципиальной питания

Питание модернизированной системы МК6033 осуществляется от сети производственного цеха предприятия. На входе схемы электрической принципиальной питания (Приложение Б) установлен трехфазный автомат QF1. Данный автомат служит для защиты электрических сетей цеха сферотокарной обработки ОАО ПГ

«УРАЛ-АРМ» в случае короткого замыкания в шкафу управления МС МК6033.

Выбор реального элемента выполнен, исходя из следующих требований:

- 3 фазы;
- ручное переключение;
- номинальный ток срабатывания: 16 А;
- номинальное напряжение 380 В;
- возможность монтирования на DIN-рейку.

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет трехфазный автоматический выключатель EZ9F34316 EASY9 SE фирмы Schneider Electric [26].

Внешний вид автоматического выключателя показан на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2. Автоматический выключатель EZ9F34316 EASY9 SE

Характеристики автоматического выключателя EZ9F34316 EASY9 SE приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Характеристики автоматического выключателя

Номинальный ток, А	16
Номинальное напряжение, В	400
Количество силовых полюсов	3
Частота, Гц	50

Для контроля включения питания в МС МК6033 использована система кнопок, установленных в шкаф управления. На схеме на схеме электрической принципиальной питания (Приложение Б) показаны кнопки SB1, SB2, SB3.

Элемент SB1 является нормально замкнутой кнопкой и используется для включения питания в шкафу управления МС МК6033. Выбор реального элемента выполнялся исходя из следующих требований:

- номинальное напряжение 400 В;
- номинальный ток 10 А;
- без фиксации;
- тип контакта нормально замкнутый.

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет кнопка ВА31 «зеленая» фирмы ЕКФ. Внешний вид элемента представлен на рисунке 6.3.

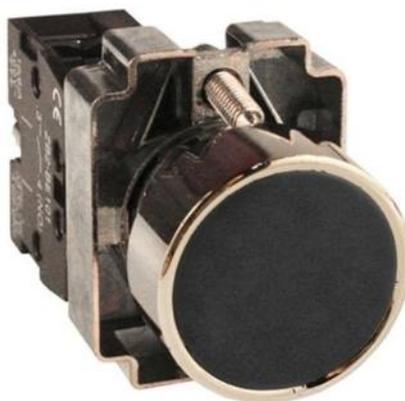


Рисунок 6.3. Кнопка включения питания

Характеристики кнопки ВА31 представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Характеристики кнопки включения питания

Номинальный ток, А	10
Номинальное напряжение, В	400
Фиксация	нет
Тип контакта	нормально замкнутый

Элемент SB1 является нормально разомкнутой кнопкой и используется для выключения питания в шкафу управления МС МК6033. Выбор реального элемента выполнялся исходя из следующих требований:

- номинальное напряжение 400 В;
- номинальный ток 10 А;
- без фиксации;
- тип контакта нормально разомкнутый.

Вышеуказанным требованиям удовлетворяет кнопка ВА41 «красная» фирмы ЕКФ. Внешний вид элемента представлен на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4. Кнопка выключения питания

Характеристики кнопки ВА31 представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3. Характеристики кнопки включения питания

Номинальный ток, А	10
Номинальное напряжение, В	400
Фиксация	нет
Тип контакта	нормально разомкнутый

Кнопка SB3 является поворотной кнопкой «грибок». Кнопка BS542 NC фирмы ЕКФ удовлетворяет требованию по номинальному напряжению в 400 В. Внешний вид кнопки показан на рисунке 6.5.



Рисунок 6.5. Кнопка аварийного отключения типа «грибок»

Характеристики поворотной кнопки представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4. Характеристики кнопки включения питания

Номинальный ток, А	10
Номинальное напряжение, В	400
Фиксация	есть
Тип кнопки	грибовидная

## 6.2 Перечень элементов модернизированной системы

Перечень элементов, используемых в проекте по модернизации приведен в таблице 6.5.

Таблица 6.5. Перечень элементов МС МК6033

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Прим.
	<u>Исполнительные элементы</u>		
КМ1	Контактор Е 12А катушка управления 220В АС3 50Гц 1НО	1	
QF1	Выключатель автоматический Schneider 3п 16А EZ9F34316 EASY9 SE	1	
QF2, QF3	Выключатель автоматический 1п 6А В ВА-101 11004DEK DEKraft SE	2	

Продолжение таблицы 6.5.

QF4	Выключатель автоматический 3п 10А В ВА-101 11029DEK DEKraft SE		
SB1	Кнопка ВА31 зеленая EKF PROxima	1	
SB2	Кнопка ВА41 красная NO EKF PROxima	1	
SB3	Кнопка BS542 поворотная красная Грибок NC EKF PROxima	1	
	<u>Функциональные блоки</u>		
A1	Программируемый логический контроллер DC2007W Berghof		
A2	Коммутационный модуль Buskouppler Berghof	1	
A3	Модуль дискретного ввода E-I/O DI16/DO16 Berghof	1	
A4	Пульт проводной PL-MPG01	1	
A5	Интегрированный сервопривод СПШ20-34100	1	
G1	Блок питания 24В DR-60W-24 PROxima	1	
G2	Блок питания БП 30-34	1	
UZF1	Преобразователь частоты Delta 3,7 кВт 380 В трехфазный (VFD037EL43A)	1	
	<u>Трансформаторы</u>		
T1	Трансформатор ОСМТ220/75/16-0.63	1	
	<u>Лампы</u>		
H1, H2	Лампа AD22DS LED 230В	2	

Приведенная в приложении Б электротехническая документация на модернизированную мехатронную систему приводов главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033 содержит указания к установке и подключению всех элементов модернизированной системы.

## 7 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 7.1 Разработка SCADA-системы управления сферотокарной обработкой

SCADA-система для управления процессом сферотокарной обработки модернизированной системы MC MK6033 создана с использованием программного продукта CODESYS.

CODESYS (англ. Controller Development System – система разработки контроллеров) инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации. Основой комплекса является среда разработки прикладных программ для ПЛК.

В CODESYS для программирования доступны пять языков программирования:

1. IL (Instruction List) – ассемблер-подобный язык;
2. ST (Structured Text) – Pascal-подобный язык;
3. LD (Ladder Diagram) – язык релейных схем;
4. FBD (Function Block Diagram) – язык функциональных блоков;
5. SFC (Sequential Function Chart) – язык диаграмм состояний.

Программа-симулятор работы МК6033 создана на языке STL.

### 7.2 Описание экранов HMI-панели

HMI-интерфейс MC MK6033 содержит 4 экрана:

1. Стартовый экран системы;
2. Экран управления системой;
3. Экран настройки параметров системы;
4. Экран контроля статуса системы.

Каждый из экранов содержит:

- кнопки переключения на другие экраны;
- кнопку возврата на предыдущий активный экран;

- кнопку выхода из системы;
- информацию о текущих дате и времени.

### 7.2.1 Стартовый экран МС МК6033

Стартовый экран содержит приветствие пользователя системы, а также ссылки на другие экраны, рисунок 7.1.

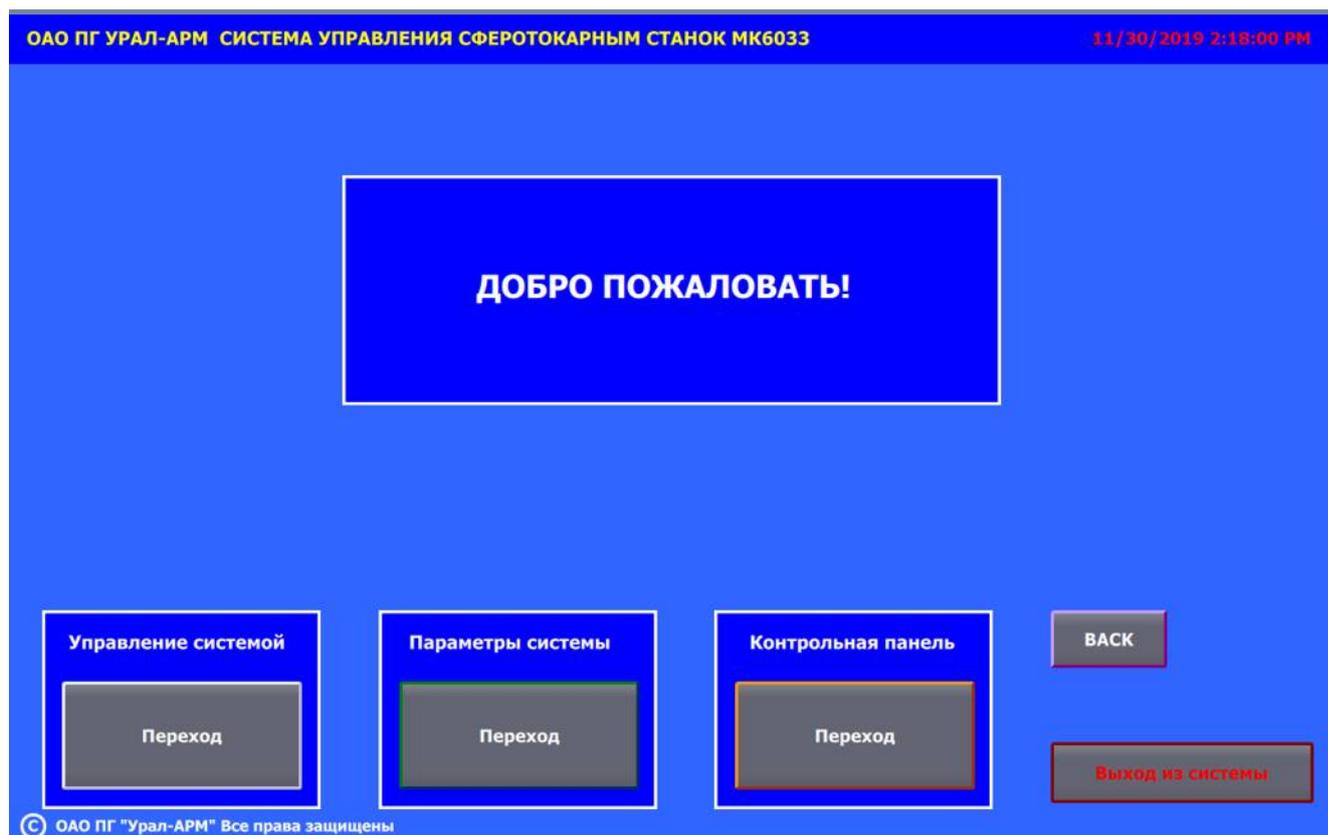


Рисунок 7.1. Стартовый экран панели оператора МС МК6033

### 7.2.2 Экран управления системой

Экран управления позволяет оператору МС МК6033 осуществлять контроль процесса сферотокарной обработки, рисунок 7.2.

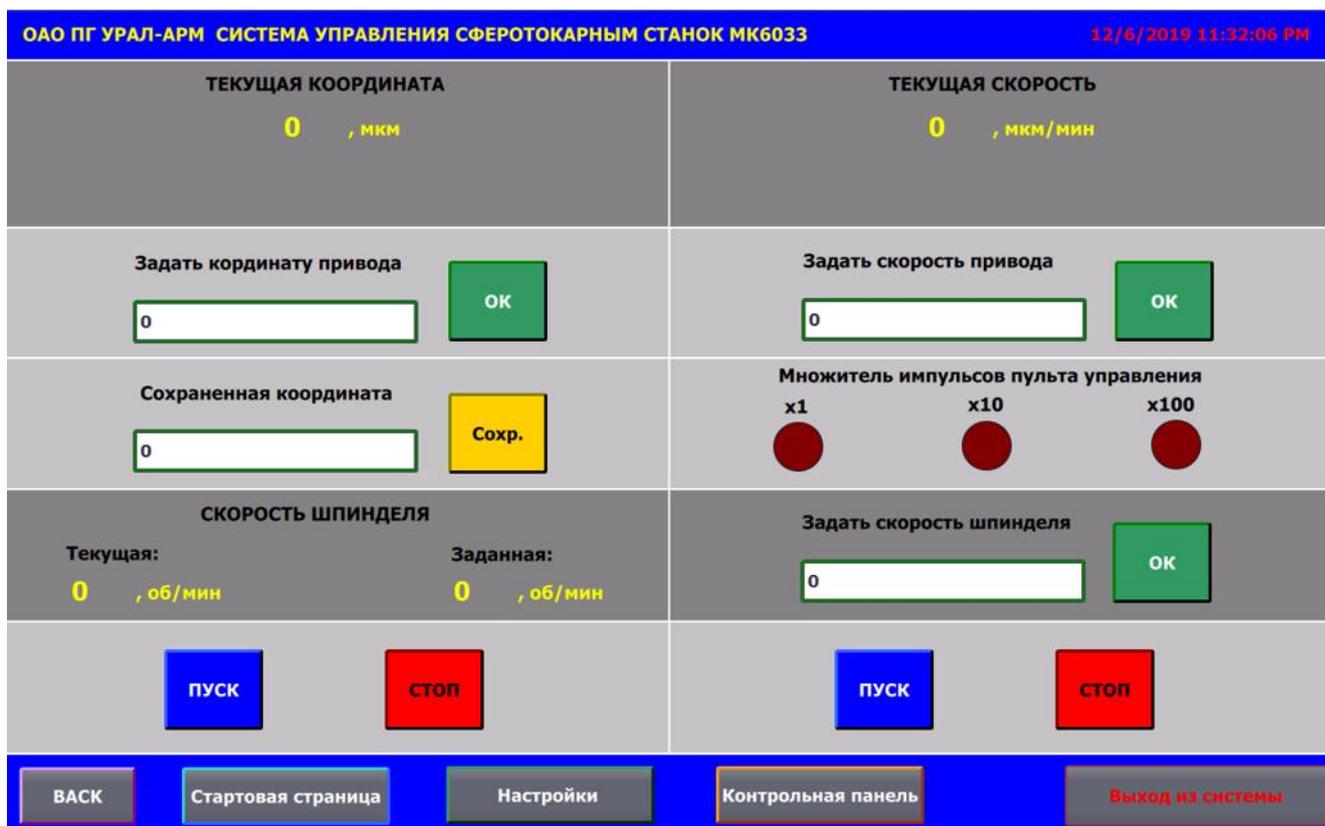


Рисунок 7.2. Экран управления панели оператора МС МК6033

Экран управления содержит следующие компоненты (см. рисунок 7.2).

Активные элементы:

1. Поле ввода координаты позиционирования линейного модуля и кнопка подтверждения ввода;
2. Поле ввода скорости линейного модуля и кнопка подтверждения ввода;
3. Кнопка сохранения координаты линейного модуля;
4. Поле ввода скорости шпинделя и кнопка подтверждения ввода;
5. Кнопка «ПУСК» – запуск движения линейного модуля;
6. Кнопка «СТОП» – остановка линейного модуля;
7. Кнопка «ПУСК» – запуск вращения шпинделя;
8. Кнопка «СТОП» – остановка вращения шпинделя.

Элементы визуализации:

1. Текущей координаты линейного модуля;
2. Текущей скорости линейного модуля;
3. Текущий множитель импульсов пульта управления линейным модулем;

4. Текущую скорость шпинделя;
5. Заданную скорость шпинделя.

### 7.2.3 Экран настройки системы

Экран настройки позволяет оператору МС МК6033 настроить дополнительные параметры системы, а также произвести ручной вывод привода в нулевую координату, рисунок 7.3.

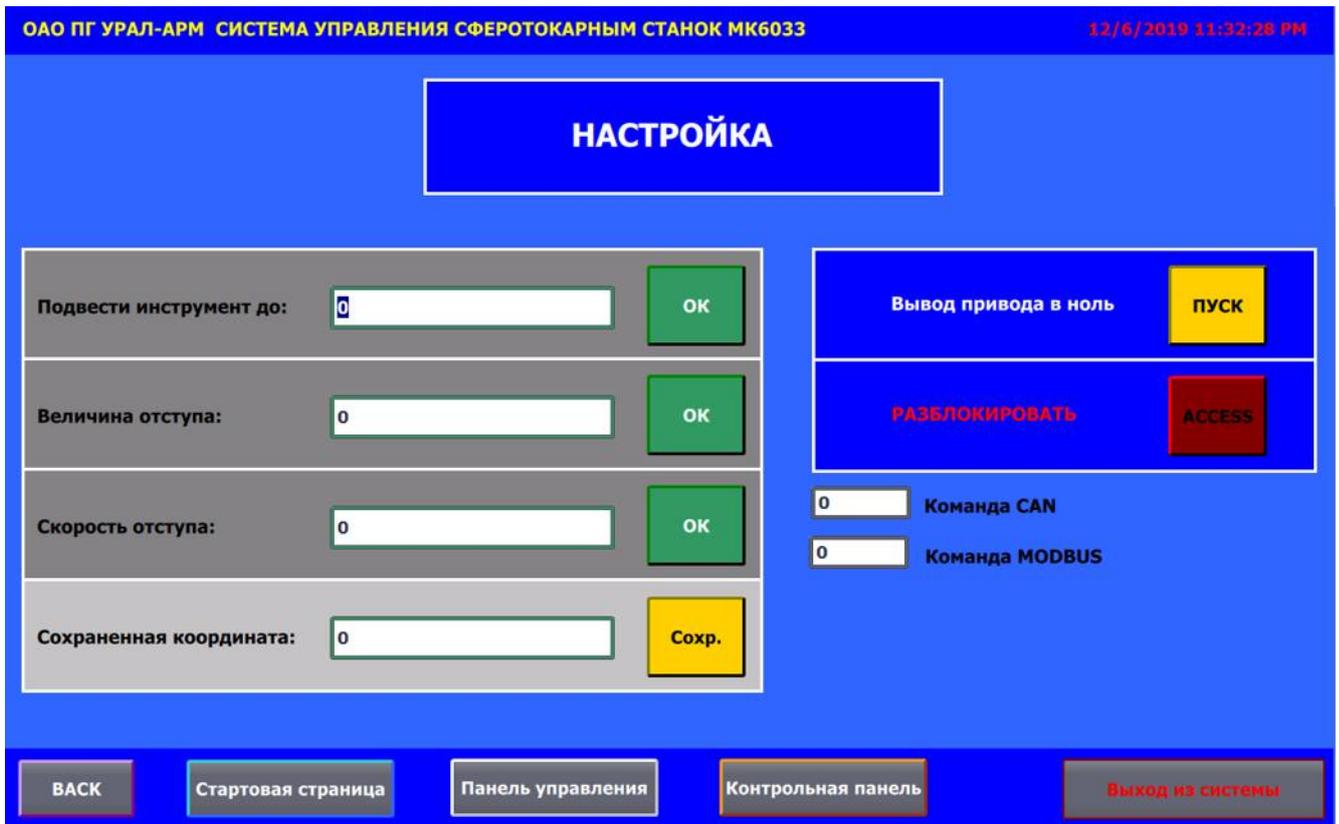


Рисунок 7.3. Экран настройки панели оператора МС МК6033

Экран настройки содержит следующие компоненты (см. рисунок 7.3).

Активные элементы:

1. Поле ввода координаты подвода инструмента к заготовке и кнопка подтверждения ввода;
2. Поле ввода величины отступа инструмента от заготовки и кнопка подтверждения ввода;

3. Поле ввода скорости отступа инструмента от заготовки и кнопка подтверждения ввода;

4. Кнопка «ПУСК» вывода привода в нулевую координату;

5. Кнопка «РАЗБЛОКИРОВАТЬ» – предоставляет оператору АСУСС доступ к системе при начале работы;

Элементы визуализации:

1. Последней поступившей команды протокола Modbus;

2. Последней поступившей команды протокола CAN.

#### 7.2.4 Экран статуса системы

Экран статуса системы содержит информацию о текущем состоянии всех элементов АСУСС: начальном и конечном положении привода, направлении движения привода, а также о текущей координате привода и состоянии процесса обработки изделия, рисунок 7.4.

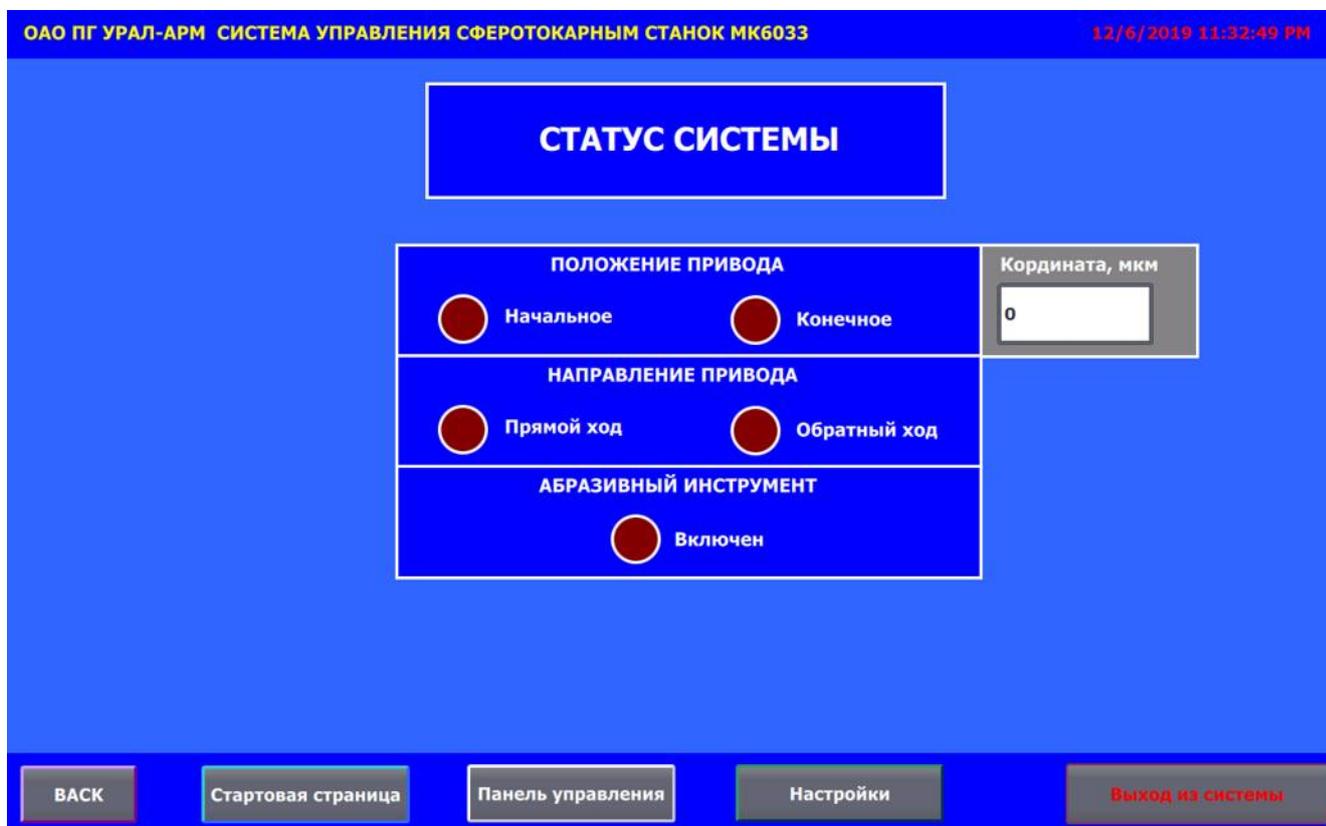


Рисунок 7.4. Экран статуса панели оператора МС МК6033

Экран статуса системы содержит следующие компоненты (см. рисунок 7.4).

Элементы визуализации:

1. Датчик начального положения привода.
2. Датчик конечного положения привода.
3. Индикатор прямого хода привода.
4. Индикатор обратного хода привода.

### 7.3 Разработка алгоритма работы МС МК6033

Процесс сферотокарной обработки с использованием модернизированной системы реализуется при помощи двух режимов работы:

- автоматического;
- ручного.

На рисунке 7.5 представлено схематичное изображение МС МК6033 с указанием исполнительных элементов и элементов управления, а также протоколов связи.

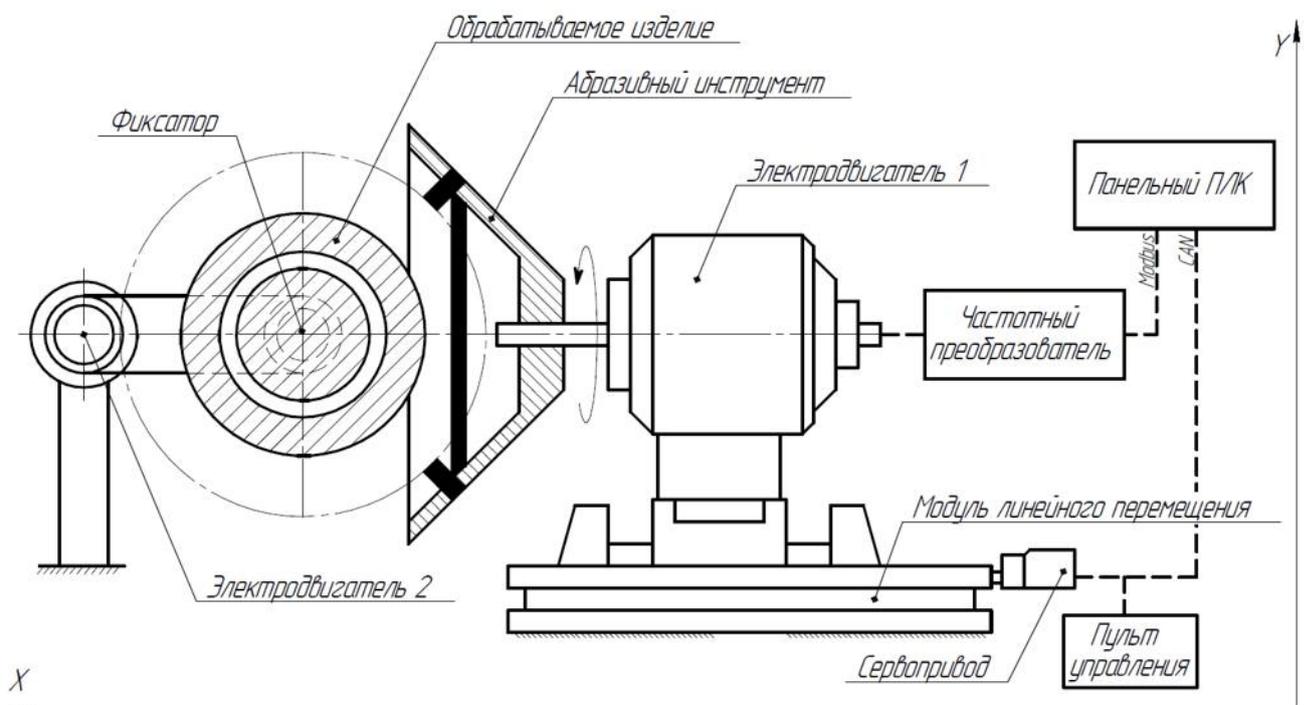


Рисунок 7.5. Схема МС МК6033

Ниже приведено описание алгоритма сферотокарной обработки с использованием МС МК6033 (далее: см. рисунки 7.1-7.5).

1. Перед началом цикла сферотокарной обработки производится проверка вывода привода в нулевую координату. Привод выводится в ноль нажатием кнопки на пульте управления или командой «Вывести привод в ноль» экрана «Настройки» панели оператора;

2. Оператор вводит значения скорости движения подачи и координаты перемещения абразивного инструмента в поля «Задать скорость привода» и «Задать координату привода» экрана «Управление системой»;

3. По достижении абразивным инструментом установленной координаты обработка изделия может осуществляться в двух режимах: ручном и автоматическом.

4. Ручной режим: оператор вводит с НМІ-панели значение скорости главного движения, поле «Задать скорость шпинделя» экрана «Управление системой». Приводится в действие абразивный инструмент. В ручном режиме предусмотрено использование кнопок пульта ручного управления.

5. Ручной режим: используя маховичок пульта управления оператор обеспечивает пошаговый подвод инструмента к заготовке, вручную управляя снятием припуска.

6. Автоматический режим: оператор вводит с НМІ-панели значение скорости главного движения (поле «Задать скорость шпинделя»), скорости врезания (поле «Задать скорость привода»), величины снимаемого припуска (поле «Задать координату привода») с экрана «Управление системой». Обработка осуществляется автоматически.

7. По окончанию обработки все элементы системы возвращаются в исходное положение.

В процессе выполнения выпускной работы магистра был разработан алгоритм работы модернизированной системы МК6033.

Алгоритм работы МС МК6033 представлен на рисунке 7.6.

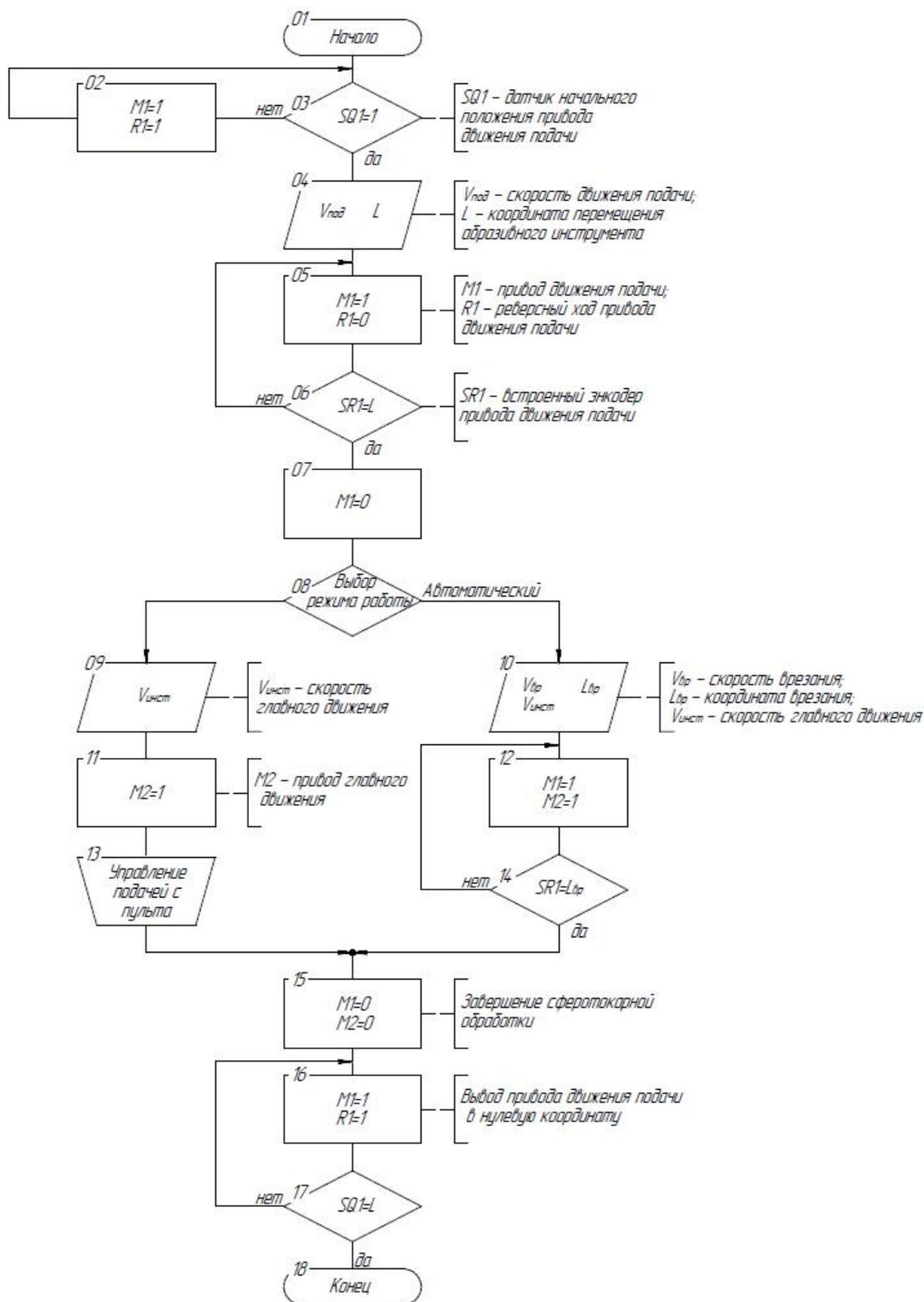


Рисунок 7.6. Алгоритм работы МС МК6033

Разработанный в виде блок-схемы алгоритм представляет собой набор инструкций, предназначенных для помощи оператору в использовании системы управления измерительным процессом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы магистра был разработан проект модернизации приводов главного движения и движения подачи сферотокарного станка МК6033 производственного цеха ОАО ПГ «УРАЛ-АРМ».

За время выполнения выпускной квалификационной работы были изучены методы выбора и введения в эксплуатацию приводной техники. Решена задача модернизации привода движения подачи путем использования мехатронного модуля линейного перемещения и сервопривода. Проведены исследования гибридного шагового двигателя, входящего в состав сервопривода. Разработаны структурная, функциональная и кинематическая схемы привода движения подачи. Разработаны тахограмма и нагрузочная диаграмма привода движения подачи, проведено математическое моделирование работы гибридного шагового двигателя. Произведен выбор частотного преобразователя для управления скоростью главного движения, решена задача модернизации привода главного движения станка. Разработана электротехническая документация на модернизированную систему, а также SCADA-система и алгоритм работы системы.

Выполнение выпускной квалификационной работы позволило ознакомиться с принципами разработки и введения в эксплуатацию модернизированных мехатронных систем для промышленного производства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. On the model of a HybridStep Motor / A. Chirila, I. Deaconu, V. Navrapescu, M. Abu, C. Ghita // ProcIEEE international conference on industrial electronics. – 2008. – V. 75, №4. – P. 54–56.
2. Штёлтинг Г. Электрические микромашины / Г. Штёлтинг, А. Байссе / Ганс-Дитер Штёлтинг; пер. с немец. В.А. Алешечкина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 229 с.
3. Acamley P.P. Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice. // The Institution of ElectricalEngineers. – 2003. – V. 24, №2. – P. 32–36.
4. Балагуров В.А Электрические машины с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев, А.Н. Ларионов. – М.: Энергия, 1964. – 480 с.
5. Характеристики интегрированного сервопривода СПШ ЗАО «ЗМИ». – <http://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18>.
6. Коэффициент трения в линейных направляющих шарико-винтовых передач. – <https://thk.ru/techfriction.shtml>.
7. Технические характеристики шарико-винтовых передач, информация о ШВП. – [http://www.zetek.ru/products/ballscrews\\_and\\_gears/ballscrews/ballscrew/](http://www.zetek.ru/products/ballscrews_and_gears/ballscrews/ballscrew/).
8. Описание протокола связи CAN, шина CAN, информация и способы подключения к шине CAN. – <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/can/start.htm>.
9. Описание протокола STEP/DIR – <https://darxton.ru/blog/signaly-step-dir/>.
10. Характеристики однофазного автоматического выключателя 11004DEK. – [schneider-electric.com/files\\_11004DEK\\_MCB18\\_instruction.pdf](http://schneider-electric.com/files_11004DEK_MCB18_instruction.pdf).
11. Размерная схема и требования к установке линейного привода СТМТ-1. – [http://zaozmi.ru/doc/linear\\_modules/ctm/tech/size\\_ctm2\\_ctmu2.pdf](http://zaozmi.ru/doc/linear_modules/ctm/tech/size_ctm2_ctmu2.pdf).
12. Технические характеристики и указания к установке линейного привода СТМТ-1. – [http://zaozmi.ru/doc/linear\\_modules/ctm/tech/passport\\_ctm.pdf](http://zaozmi.ru/doc/linear_modules/ctm/tech/passport_ctm.pdf).
13. Технические характеристики, руководство пользователя и указания к монтажу шпиндельного узла ХТ30. – <https://www.et-rus.ru/shpindelnyyuzelxt301.pdf>.

14. Технические характеристики и руководство пользователя преобразователя частоты Delta. – [http://www.intechnics.ru/download/vfdel\\_flayer.pdf](http://www.intechnics.ru/download/vfdel_flayer.pdf).
15. Характеристики трехфазного автоматического выключателя 11029DEK Schneider. – [https://www.schneider-electric.com/files11029DEK\\_instruction.pdf](https://www.schneider-electric.com/files11029DEK_instruction.pdf).
16. Характеристики четырехфазного контактора E LC1E1210M5 Schneider. – <https://www.schneider-electric.co.in/en/product/download-pdf/LC1E1210M5.pdf>.
17. Описание протокола связи Modbus RTU. – <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/>.
18. Описание протокола связи Ethernet, использование Ethernet в промышленных системах автоматизации. – <https://www.speedcheck.org/ru/wiki/ethernet/>.
19. Руководство по эксплуатации программируемого логического контроллера DC2007 Berghof. – [ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof\\_RE\\_4809.pdf](ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof_RE_4809.pdf).
20. Руководство по эксплуатации модуля расширения E-I/O Berghof. – [ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof\\_RE\\_5396.pdf](ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof_RE_5396.pdf).
21. Описание протокола связи EtherCAT, использование EtherCAT в промышленных системах автоматизации, преимущества и особенности EtherCAT. – [https://www.beckhoff.ru/ru/pdf/press/2007/CER\\_07\\_\(23\)2007\\_28-29.pdf](https://www.beckhoff.ru/ru/pdf/press/2007/CER_07_(23)2007_28-29.pdf).
22. Международная электротехническая комиссия, деятельности и нормативы. <https://mc.misis.ru/practicum/standart/IEC.htm>
23. Руководство по эксплуатации модуля-каплера E-I/O BUSCOUPLER. – [ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof\\_RE\\_5396.pdf](ftp://ftp.totalkip.ru/report.local/re/Berghof_RE_5396.pdf).
24. Технические параметры блока питания DR-60W-24 PROxima – <https://ekfgroup.com/uploads/products/F87DAAC47AAD8B41BFC0CE3F469A4.pdf>.
25. Руководство пользователя PL-MPG01 фирмы Purelogic. – [https://purelogic.ru/data/docs/elektronika\\_chpu/cnc\\_pendant\\_pl\\_mpg01\\_setup\\_manual\\_ru.pdf](https://purelogic.ru/data/docs/elektronika_chpu/cnc_pendant_pl_mpg01_setup_manual_ru.pdf).
26. Характеристики трехфазного автоматического выключателя EZ9F34316 – [https://www.schneider-electric.com/filesSE\\_Easy9\\_MCB18\\_instruction.pdf](https://www.schneider-electric.com/filesSE_Easy9_MCB18_instruction.pdf).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Функциональная схема автоматизации МС МК6033

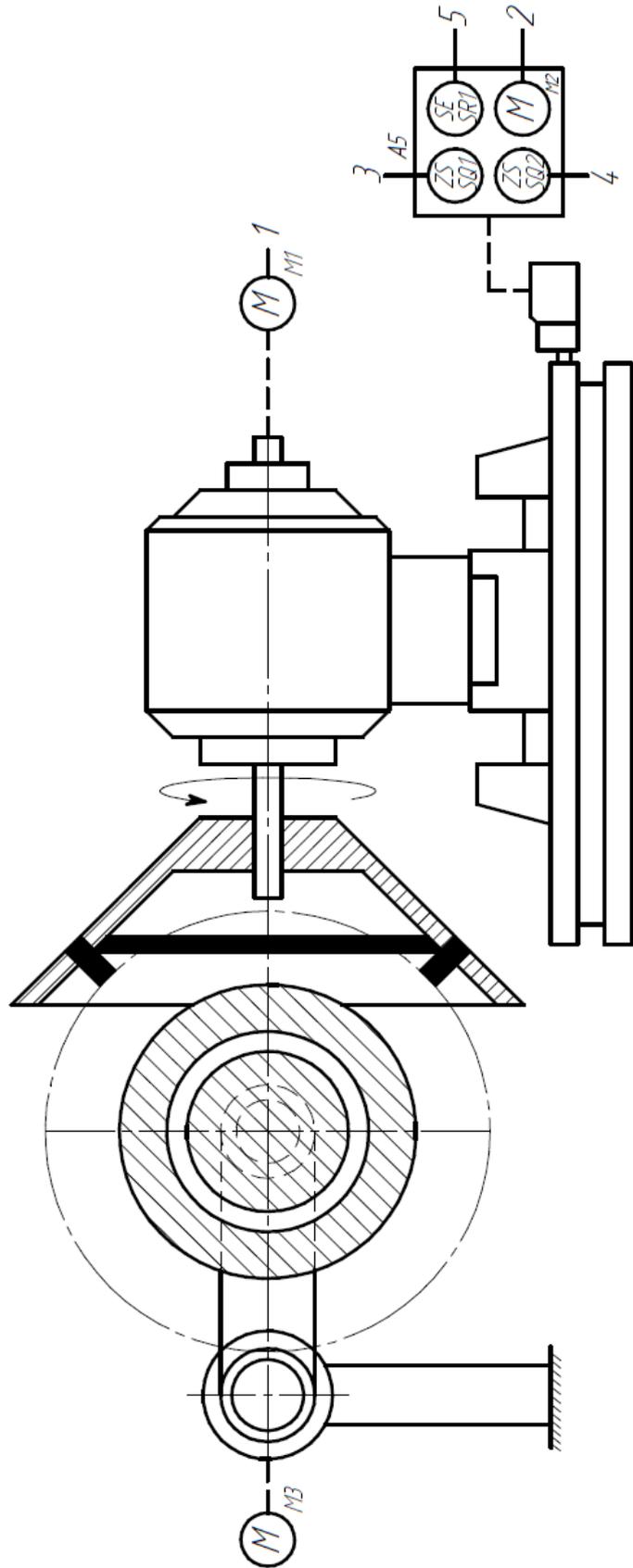


Рисунок А.1. Схема автоматизации функциональная МС МК6033 (Лист 1)

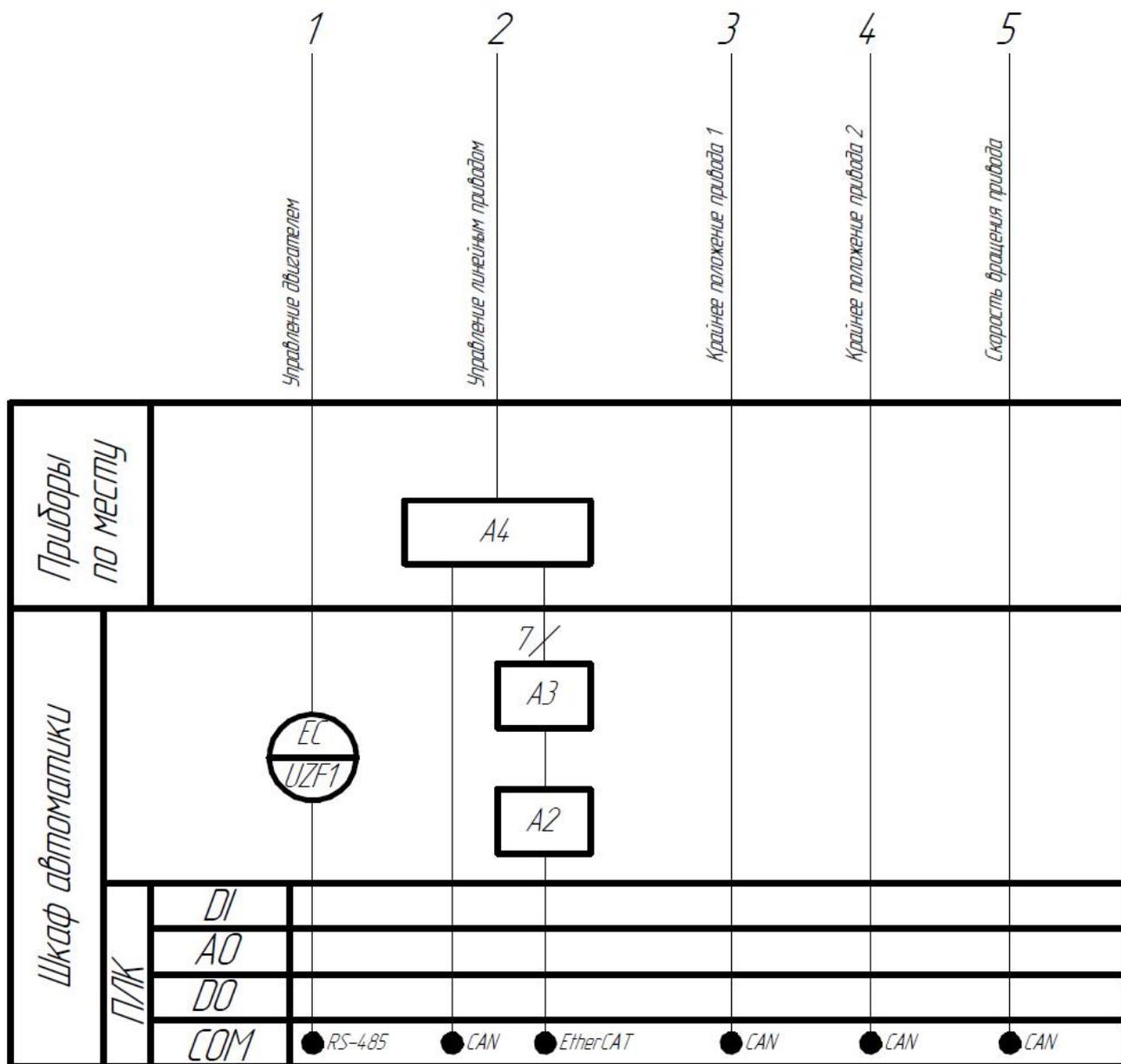


Рисунок А.2. Схема автоматизации функциональная МС МК6033 (Лист 2)

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Электротехническая документация МС МК6033

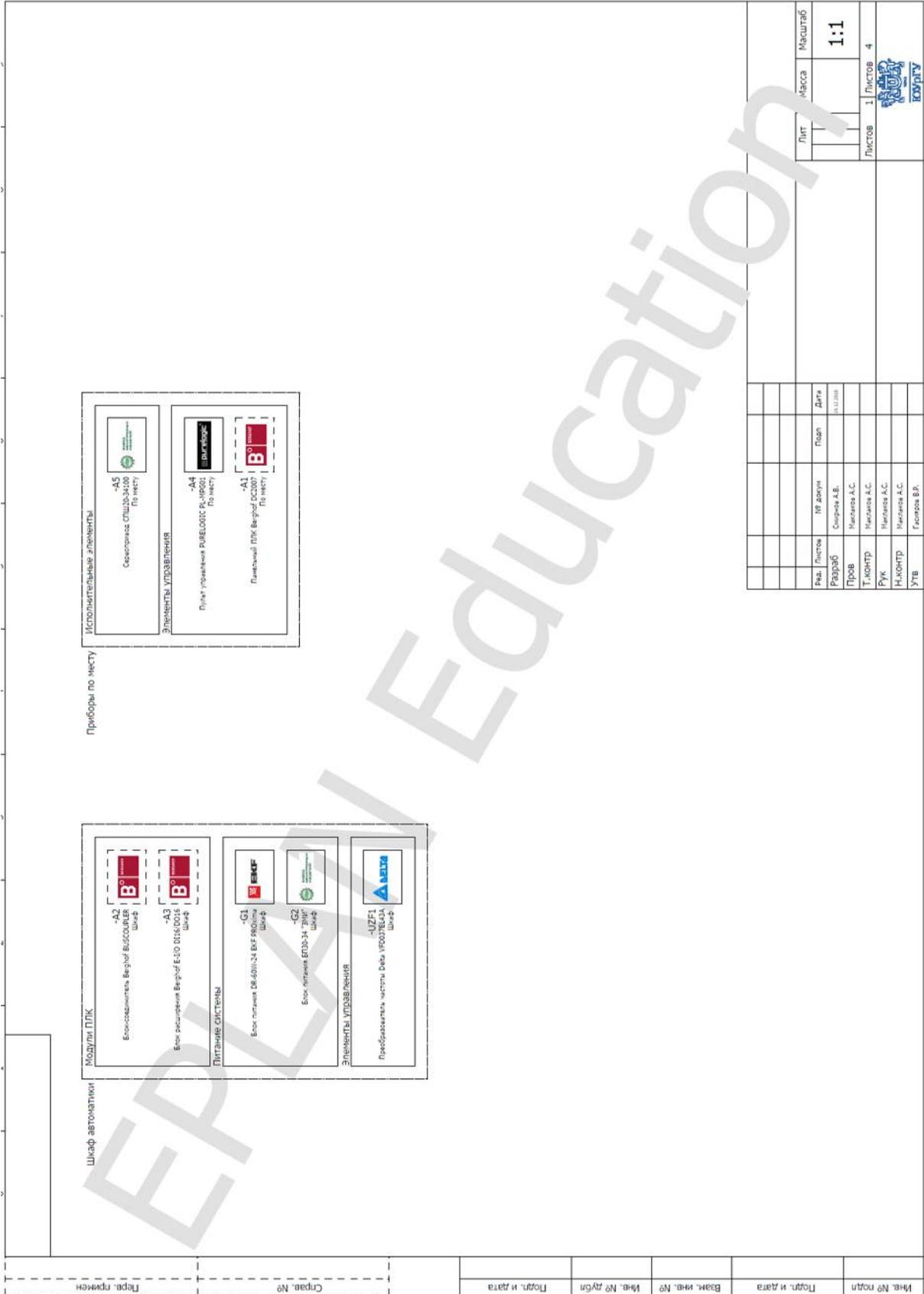


Рисунок Б.1. Указания по установке элементов МС МК6033

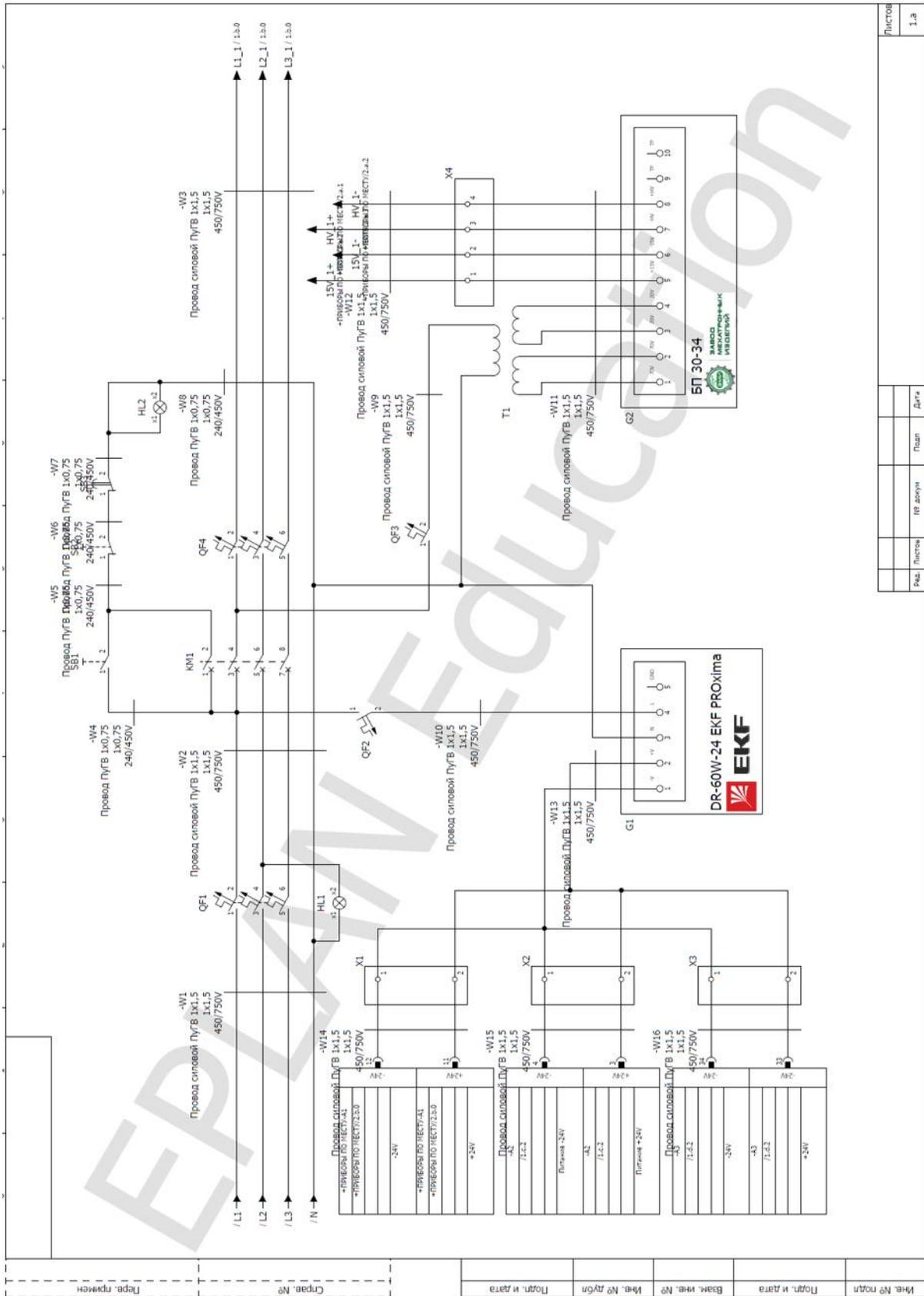


Рисунок Б.2. Схема электрическая принципиальная питания MS MK6033

Листов	1,а
Ряд	Листов
№ док.	Пап
Дат	

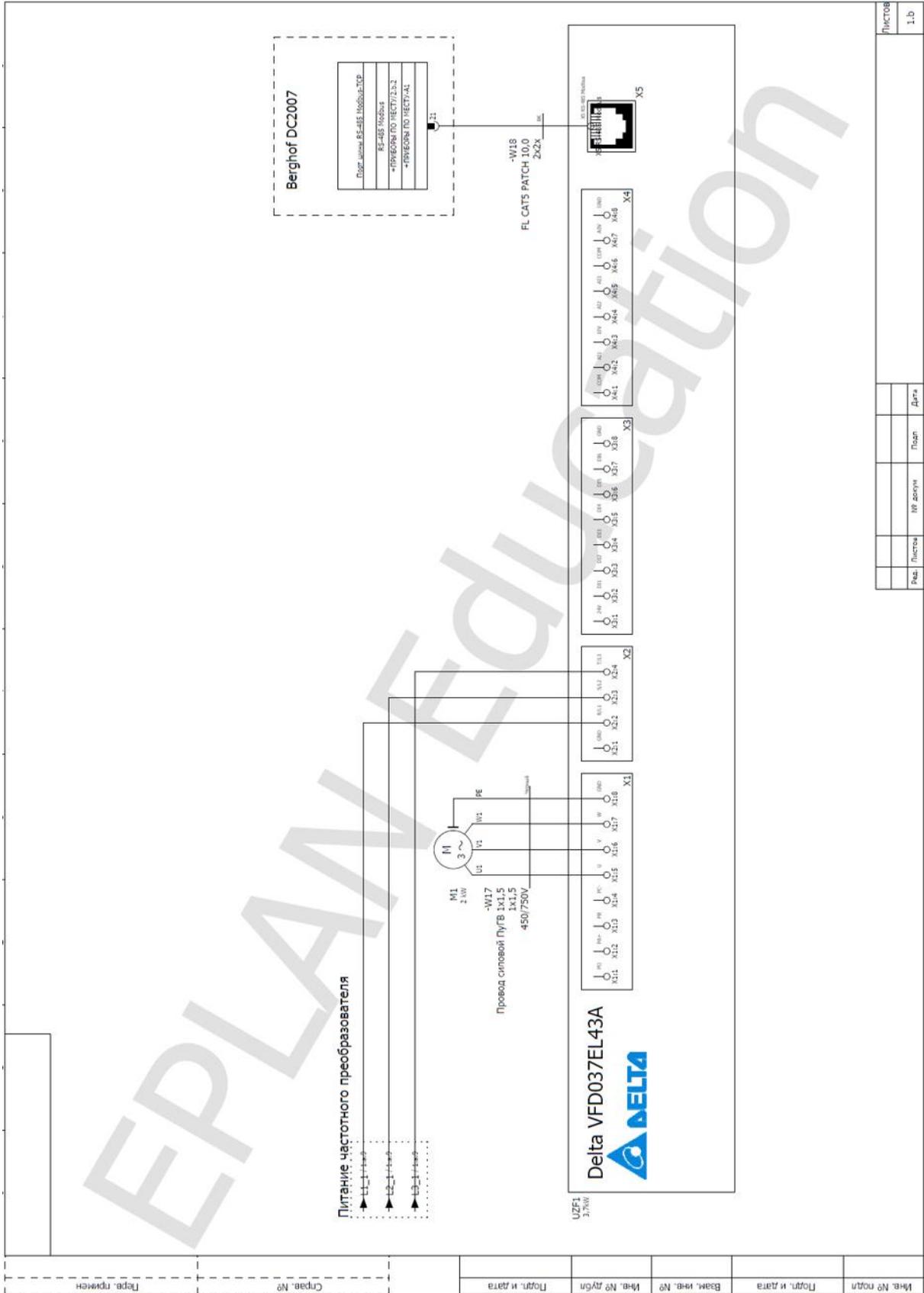


Рисунок Б.3. Схема электрическая принципиальная привода главного движения МС МК6033

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Изм. № дубл.	Подп. и дата	Листов
					1.б





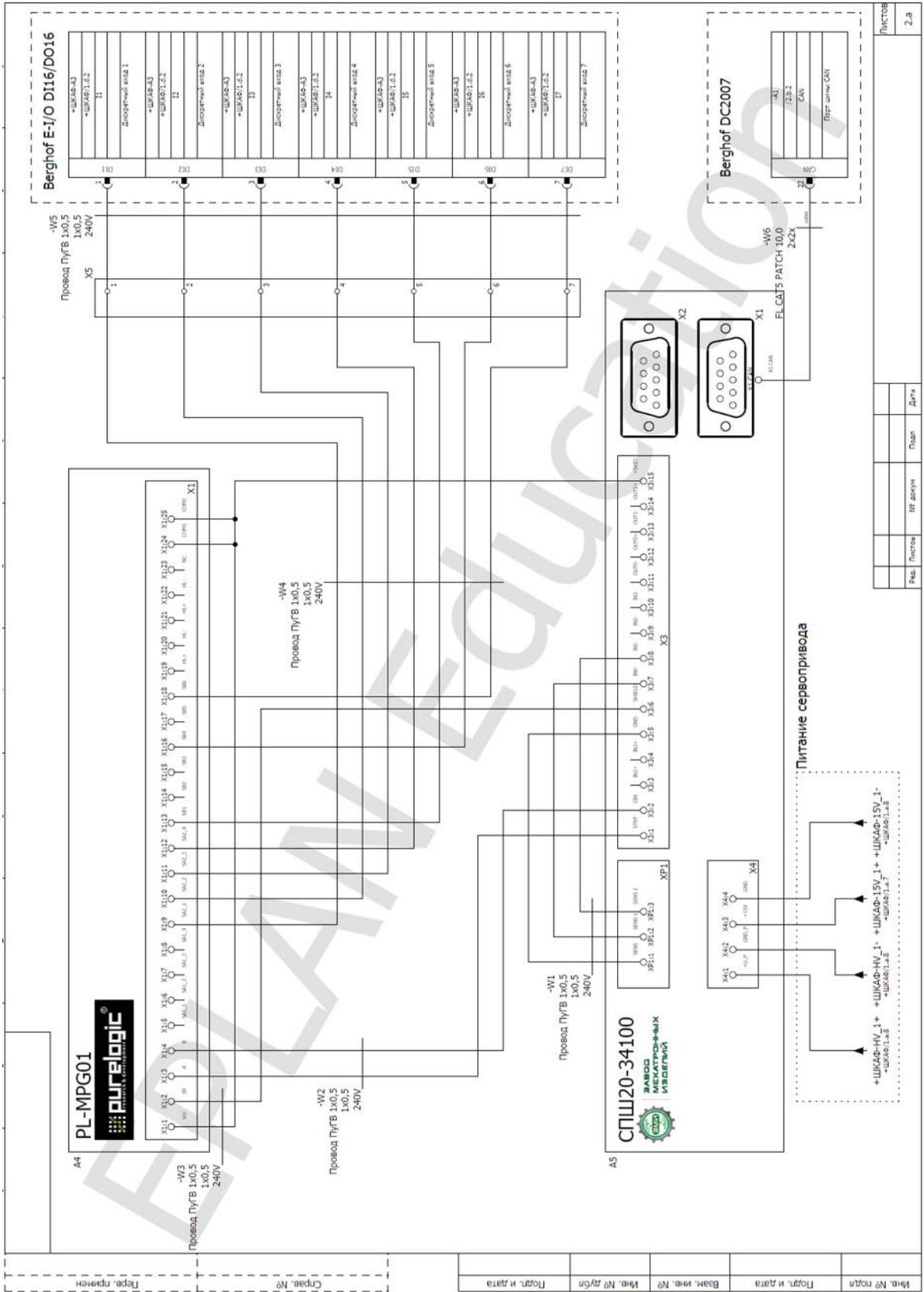


Рисунок Б.6. Схема электрическая принципиальная привода движения подачи МС МК6033

