

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра робототехники и технической кибернетики

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Сочнев А.Н.
«26» июня 2024 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Разработка лабораторного практикума на базе робота «Электроника НЦТМ-01»

Руководитель	_____	кандт. техн.наук., доц. Каф. РиТК	<u>Г. Б. Масальский</u>
	подпись, дата		
Выпускник	_____		<u>Е. И. Рыбкин</u>
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____	ст. преподаватель	<u>В. Н. Куликова</u>
	подпись, дата		

Красноярск 2024

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра робототехники и технической кибернетики

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А. Н. Сочнев
«22» апреля 2024 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Красноярск 2024

Студенту: Рыбкину Егору Ильичу.

Группа: ФЭ20-08Б Направление подготовки: 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Тема выпускной квалификационной работы: разработка лабораторного практикума на базе робота «Электроника НЦТМ-01».

Утверждена приказом по университету №1588/с от 02.02.2024.

Руководитель ВКР: Г. Б. Масальский – кандидат технических наук, доцент кафедры РИТК.

Исходные данные для ВКР: техническая документация ПР НЦТМ-01, дипломный проект «Модернизация и исследование учебной робототехнической системы» В. Е. Букалин, отчет по преддипломной практике «Разработка системы управления робота «Электроника НЦТМ» К. Е. Вшивков.

Перечень работ ВКР: описание объекта управления, модернизация системы управления, разработка и описание принципиальных схем в EPLAN Electric и КОМПАС 3Д, разработка модели робота НЦТМ-01 в MATLAB Simulink, разработка управляющей программы в среде Matlab, MicroWin и Arduino IDE, проведение пусконаладочных работ, разработка мероприятий по безопасности и экономический расчёт проекта.

Перечень графического материала: схема подключения ПЛК, схема подключения модуля расширения EM223, схема подключения Arduino, схема подключения приводов, схема подключения датчиков, схема механизма поворота, схема механизма захвата, принципиальная схема манипулятора электромеханическая, схема пневматическая электропневматического распределителя, общая структурная схема системы управления.

Руководитель ВКР

подпись, дата

Г. Б. Масальский

Задание принял к исполнению

подпись, дата

Е. И. Рыбкин

«__» _____ 2024г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка лабораторного практикума на базе робота «Электроника НЦТМ-01» содержит 86 страницы текстового документа, 88 иллюстраций, 19 таблиц, 4 приложения, 12 использованных источников.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА, ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ, MATLAB, SIMULINK, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Создание лабораторного практикума необходимо для овладения компетенциями, требуемые современному инженеру, по наладке, монтажу, разработке и чтению принципиальных схем, умению работать с документацией и программными средами моделирования и проектирования.

Целью бакалаврской работы является разработка материалов для лабораторного практикума на основе робота-манипулятора НЦТМ-01.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- создать компьютерную модель на основе CAD-файлов звеньев робота;
- расширить функционал системы управления;
- разработать интерфейс управления между оператором и роботом;
- исследовать работу всех приводов и звеньев робота;
- составить лабораторный практикум на основе системы управления;
- произвести пусконаладочные работы;
- разработать принципиальные схемы;

В работе был изучен объект управления, устранена часть недостатков системы управления, были изучены методы управления роботом, на основе которых создана компьютерная модель в Simulink.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Робот НЦТМ-01 как объект управления	9
1.1 Общее описание робота НЦТМ-01	9
1.2 Механизм горизонтального перемещения вдоль оси X	10
1.3 Механизм поворота робота НЦТМ-01	14
1.4 Механизм горизонтального перемещения вдоль оси Y	15
1.5 Механизм подъема по оси Z	16
1.6 Механизм захватного устройства	16
2 Описание системы управления	17
2.1 Внешний вид системы управления робота НЦТМ-01	17
2.2 Описание промышленного контроллера S7-200	19
2.3 Описание релейного блока	20
2.4 Описание блока преобразователя	21
3 Разработка и описание принципиальных схем в EPLAN Electric и КОМПАС 3Д	23
4 Разработка модели робота НЦТМ-01 в MATLAB Simulink	26
4.1 Разработка модели привода робота	26
4.1.1 Моделирование двигателя постоянного тока	26
4.1.2 Моделирование зубчатой передачи привода с помощью Simscape Multibody	30
4.1.3 Моделирование зубчатой передачи привода с помощью Simscape Mechanical	34
4.2 Разработка пневмосистемы в системе MATLAB Simulink	35
4.2.1 Моделирование пневмосистемы ротации захвата	35
4.2.2 Моделирование пневмосистемы сжатия схвата	39
4.3 Сборка модели звеньев робота	40
4.4 Кинематический анализ робота на основе модели	44
5 Разработка управляющей программы	47
5.1 Определение системы координат робота НЦТМ-01	47
5.2 Решение обратной задачи кинематики методом оптимизации	50
5.3 Организация связи между устройствами системы управления	54
5.3.1 Связь между Arduino и Matlab	54
5.3.2 Связь между Arduino и ПЛК Siemens S7-200	55
5.4 Разработка управляющей программы для ПЛК	56
5.5 Разработка интерфейса управления в MATLAB GUIDE	57
6 Проведение пусконаладочных работ	58
7 Безопасность и экономичность проекта	63
7.1 Безопасность и экологичность проекта	63
7.1.1 Безопасность оборудования	63
7.1.2 Пожарная безопасность	64
7.1.3 Экологическая безопасность материалов	64
7.2 Экономический анализ проекта	64

7.2.1 Расчет стоимости программного обеспечения	64
7.2.2 Расчет затрат на электроэнергию	66
7.2.3 Расчет затрат на амортизацию оборудования.....	66
7.2.4 Смета затрат.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	70
ПРИЛОЖЕНИЕ А Разработка лабораторного практикума	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Листинг программы решения ОЗК и ПЗК	80
ПРИЛОЖЕНИЕ В Листинг программы передачи данных с Arduino на Matlab.	81
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Листинг программы управления роботом НЦТМ-01	83

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития российской экономики характеризуется ограниченностью человеческих и материальных ресурсов. Быстрый рост образовательного, культурного и материального уровня трудящихся привел к изменению требований к условиям работы и содержанию трудовых процессов. Ручной труд, особенно малоквалифицированный, монотонный и тяжелый, становится все менее привлекательным и не престижным, особенно для молодых специалистов.

Использование промышленных роботов позволяет заменить человека на монотонных и тяжелых работах. Кроме того, роботы обладают достаточной гибкостью для выпуска продукции средними и малыми партиями, что особенно актуально в области, где традиционные средства автоматизации неэффективны. Второй уровень автоматизации включает в себя постановку и снятие деталей со станка, то есть автоматизацию процесса загрузки оборудования. Это позволяет рабочему обслуживать несколько технологических единиц, переходя к многостаночному обслуживанию. Промышленные роботы широко используются в качестве загрузочных устройств благодаря своей универсальности и скорости переналадки.

Однако высокие затраты на автоматизацию оставляют многих руководителей и предпринимателей в нерешительности. Это особенно актуально для мелких и средних предприятий, которых становится все больше. Ограниченные финансовые возможности заставляют их осторожничать. Одним из доступных способов обновления производства является восстановление станков с программным управлением и автоматизированной загрузкой.

Согласно расчетам ИСИЭЗ НИУ ВШЭ за 2022 год около 19% организаций обрабатывающих производств использовали промышленных роботов [1]. Это говорит о высокой востребованности предприятиями в ускоренном переходе на роботизированное и цифровое производство. Распределение удельного веса организаций обрабатывающей промышленности, использующих промышленных роботов приведено на рисунке В.1.

Отрасли обрабатывающей промышленности	Россия	ЕС-27
Производство лекарственных средств и материалов, применяемых в медицинских целях и ветеринарии	35.0	13.7
Производство резиновых и пластмассовых изделий; прочей неметаллической минеральной продукции	29.7	21.4
Производство пищевых продуктов, напитков, табачных изделий	23.2	7.9
Обработка древесины и производство изделий из дерева и пробки, кроме мебели; производство бумажных изделий; деятельность полиграфическая и копирование носителей информации	20.8	11.5
Производство металла; готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования	20.5	25.0
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий	18.6	18.2
Производство автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов; прочих транспортных средств и оборудования	18.4	35.9
Производство электрического оборудования	17.0	19.4
Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки	17.0	21.1
Производство текстильных изделий, одежды, кожи и изделий из кожи	14.8	6.4
Производство химических веществ и химических продуктов	13.5	13.9
Производство мебели; прочих готовых изделий; ремонт и монтаж машин и оборудования	5.3	11.5
Производство кокса и нефтепродуктов	4.6	9.5

Рисунок В.1 – Удельный вес применения промышленных роботов по отраслям промышленности

Внедрение робототехники в производство – важный этап цифровой трансформации предприятий независимо от отрасли. Россия пока отстает в этом направлении и нуждается во внедрении сотен тысяч промышленных роботов, чтобы приблизиться к развитым странам по показателю роботизации производства. На рисунке В.2 приведены результаты исследования по внедрению цифровых технологий ИСИЭЗ НИУ ВШЭ за 2020 год [2].

Ранг	Технологии	Направления	Индекс значимости
1	Промышленные роботы		1,00
2	Искусственный интеллект		0,86
3	Машинное обучение		0,68
4	Цифровое прототипирование		0,56
5	Сенсорика		0,42
6	Беспроводная связь WLAN, PAN, RFID		0,30
7	Блокчейн		0,21
8	Большие данные		0,20
9	Виртуальная и дополненная реальность		0,12
10	Товар как услуга (Product-as-a-Service)		0,09

Рисунок В.2 – Удельный вес применения промышленных роботов по отраслям промышленности

На первом месте оказалось внедрение промышленных роботов, что объясняется необходимостью расширения производственных мощностей, гибкостью и вариативностью роботизированных систем при различных производственных ситуациях и существенной экономией материальных и энергетических ресурсов.

Следуя современным запросам промышленности к роботизации и цифровизации, особую актуальность имеет изучение проектирования и разработки роботизированных систем с учетом методов, внедряемых на производстве. Особенное значение имеет разработка системы управления как основополагающего элемента всей системы, в котором заложено как программная часть, так и конструкторская вместе с проектной.

С этой целью решено произвести модернизацию системы управления роботом НЦТМ-01, который был создан в 80-е годы в НИИ точного машиностроения г. Зеленоград. Указанный робот, несмотря на давность разработки, полностью отвечает требованиям современного производства, но необходимо отметить, что функциональные возможности робота - его универсальность и гибкость, быстрота перепрограммирования (обучаемость), число позиций, обслуживаемых рабочим органом, точность позиционирования, быстродействие и ряд других качеств в значительной мере определяются его информационно-управляющей системой [3].

Разработка лабораторного практикума на основе данной системы управления позволит молодым специалистам охватить все требуемые навыки:

разработка и проектирование систем, электромонтаж, чтение функциональных и принципиальных схем, разработка программ управления с использованием различных сред программирования. В то же время наличие реального объекта управления позволит углубленно изучить процесс управления на уровне электрических схем, понять, каким образом контроллер управляет всей схемой и обеспечивает выполнение необходимых команд.

1 Робот НЦТМ-01 как объект управления

1.1 Общее описание робота НЦТМ-01

Современное предприятие невозможно представить без применения систем автоматизации, направленных на повышение производительности и качества выпускаемой продукции. Данные системы исключают присутствие человека в производственном цикле, обеспечивают точное позиционирование рабочих элементов и постоянный мониторинг необходимых показателей. Контроль над системами автоматизации осуществляется за счет систем управления (СУ). Любой объект управления (ОУ) может быть представлена в виде, изображенном на рисунке 1.1 [4]:

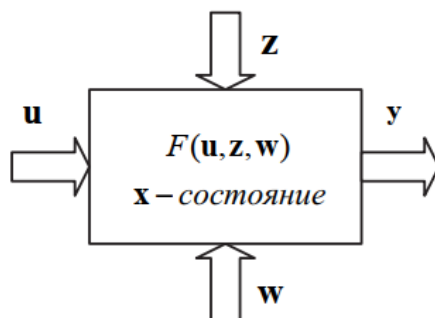


Рисунок 1.1 – Структурная схема ОУ

где $u = u(t) = [u_1(t)u_2(t)..u_m(t)]^T$ вектор управляющих воздействий, t – время, T – знак транспонирования; функций проектирования, представляет собой организационно-техническую систему; $z = z(t) = [z_1(t)z_2(t)..z_r(t)]^T$ – вектор контролируемых неуправляемых воздействий (возмущений); $x = x(t) = [x_1(t)x_2(t)..x_n(t)]^T$ – вектор состояния ОУ, содержащий всю информацию о прошлом ОУ, необходимую для определения реакции на входные воздействия; $y = y(t) = [y_1(t)y_2(t)..y_n(t)]^T$ – вектор наблюдаемых выходных переменных.

Робот «Электроника НЦ ТМ–01», представленный на рисунке 1.2, предназначен для обслуживания металлорежущих токарных станков, а именно для загрузки и выгрузки деталей типа тел вращения диаметром до 150 мм, высотой до 150 мм.

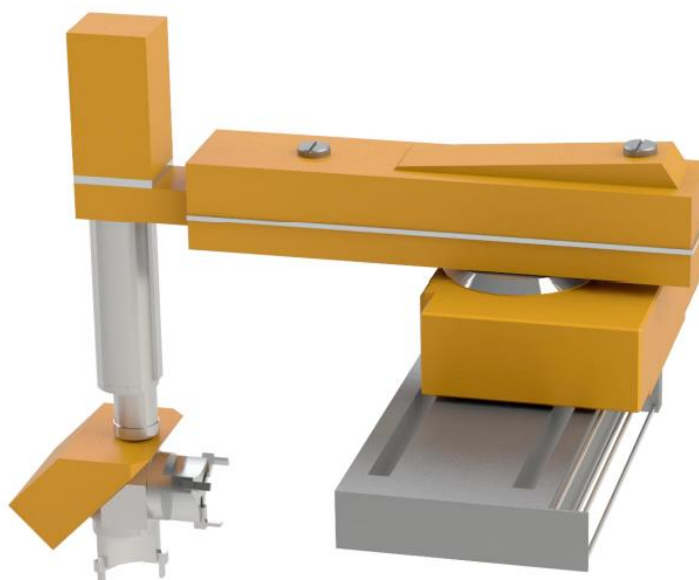


Рисунок 1.2 – Общий вид робота НЦТМ-01

Робот должен функционировать в стационарных условиях, в закрытых, отапливаемых помещениях при:

- относительной влажности до 80 при температуре 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги;
- температуре от 10 °С до 35 °С;
- атмосферном давлении 86,66 – 106,66 кПа (650 – 800 мм.рт.ст.).

1.2 Механизм горизонтального перемещения вдоль оси X

Робот НЦТМ-01 обеспечивает пять степеней подвижности, одной из которых является горизонтальное перемещение, определяемое в документации как перемещение по оси X. Перемещение осуществляется благодаря применению привода, зубчатой передачи и шарико-винтовой пары (ШВП).

Привод, состоящий из магнитного тормоза, двух двигателей постоянного тока и зубчатой передачи, представлен на рисунке 1.3. Питание осуществляется подачей напряжения к четырем питающим входам, на два других входа питание подается для обеспечения торможения. Исполнительным органом является двигатель постоянного тока ДПМ 30-Н2-01, представленный на рисунке 1.4, технические характеристики которого приведены в таблице 1.1.



Рисунок 1.3 – Привод робота НЦТМ-01



Рисунок 1.4 – Два электродвигателя ДП32-4-3-27

Таблица 1.1 – Характеристики двигателя ДП32-4-3-27

Наименование двигателя	U, В	$P_{2 \text{ ном}}, \text{ Вт}$	$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	$M_{\text{ном}}, \text{ мН} \cdot \text{ м}$	$M_{\text{п}}, \text{ мН} \cdot \text{ м}$	$I_{\text{ном}}, \text{ А}$	m, кг	$J \cdot 10^{-7}, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$
ДП32-4-3-27	27	4	3000	1,3	10	4	0,193	39

Под условными обозначениями электрических параметров двигателей ДП приняты:

- U есть напряжение питания двигателя;
- $P_{2 \text{ ном}}$ есть номинальная мощность;
- $n_{\text{ном}}$ есть номинальная частота вращения двигателя;
- $M_{\text{ном}}$ есть номинальный вращающий момент;
- $M_{\text{п}}$ есть пусковой момент
- $I_{\text{ном}}$ есть номинальный потребляемый ток;

- m есть масса двигателя;
- J есть момент инерции вала двигателя.

Для преобразования вращательного движения с двигателями на выходной вал привода используются три прямозубых цилиндрических зубчатых колеса, два из которых расположены на валу двигателя, а одно – между ними. Технические параметры зубчатых колес представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические параметры зубчатых колес привода

Зубчатое колесо	Модуль	Число зубьев
На валу двигателя	0,5	20
Между валов двигателя	0,5	60

Передаточное отношение, обеспечиваемое зубчатыми колесами, равняется трем. Привод имеет реверсивный режим работы, возможность управления скоростью за счет изменения напряжения. Торможение может быть динамическое, обеспечиваемое релейным ключом, или статическое, обеспечиваемое двумя фрикционными тормозами.

Вращательный момент на выходном валу передается на зубчатую передачу, состоящую из трех зубчатых колес, обеспечивающих плавное уменьшение угловой скорости, тем самым увеличивая момент. Зубчатая передача представлена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Зубчатая передача в механизме перемещения по оси X

Технические параметры зубчатых колес представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические параметры зубчатых колес механизма по оси X

Зубчатое колесо	Модуль	Число зубьев
Малое	0,5	30
Среднее	0,5	50
Большое	0,5	60

Вращательное движение преобразуется в поступательное за счет использования ШВП. В документации к роботу не были обнаружены параметры винта, поэтому вручную были проведены замеры, применен метод реплики для более точного замера параметров ШВП, которые представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры ШВП

Шаг, мм	Диаметр выступов, мм	Диаметр впадин, мм	Длина резьбы, мм	Ширина выступа, мм
4,5	12	10	354	2

Наличие ШВП в механизме перемещения обеспечивает следующие преимущества:

- плавность работы с высокой нагрузкой, ведь на данное звено нагружают все последующие звенья;
- высокая осевая жесткость и точность перемещения;
- высокая бесшумность работы;
- КПД до 95% вследствие малых потерь на трение.

Для управления роботом необходимо знать положение всех его осей в пространстве в текущий момент времени, что осуществляется благодаря оснащению робота датчиками. Датчики обеспечивают управление с обратной связью, благодаря сравнению заданного положения с текущим, полученным путем замеров с датчиков. Механизм горизонтального перемещения по оси X оснащен тремя оптическими датчиками для отслеживания начального и конечного положений, а также для измерения скорости движения звена. Все эти датчики одной модели - АУБ178.32.00.000, их дискретность равна 0,4 мм / импульс, с той лишь разницей, что датчики начального и конечного положения подают импульс лишь при достижении роботом соответственно начального или конечного положений, в то время как импульсный датчик подает сигналы при перемещении механизма по оси. Это осуществляется благодаря диску с отверстиями, который насажен на выходной вал приводов, данная система является энкодером робота. Это позволяет измерить перемещение робота в импульсах, преобразуя его в расстояние в миллиметрах, а также получить значение скоростей, подсчитывая количество импульсов в секунду. Оптический датчик представлен на рисунке 1.6, где 1 – это излучатель, 2 – GND (общая точка), 3 – VCC (+5В).



Рисунок 1.6 – Оптический датчик

1.3 Механизм поворота робота НЦТМ-01

Механизм поворота закреплен на каретке, относящейся к механизму горизонтального перемещения по оси X, и состоит из корпуса, на котором закреплен привод, коническая зубчатая передача, водило и мальтийский крест, на мальтийском кресте установлен стакан. Вращение водила осуществляется от привода через коническую передачу. Для фиксации мальтийского креста в крайних положениях используется выдвижной фиксатор, управляемый кулачком, кинематически жестко связанным с водилом.

Двигатель постоянного тока, применяемый в приводе механизма вращения – ДП40-10-3-27, представлен на рисунке 1.7. Технические характеристики двигателя представлены в таблице 1.5. Данный двигатель отличается от двигателя, применяемого для перемещения по оси X, повышенными характеристиками момента, мощности и скорости вращения.



Рисунок 1.7 – Двигатель ДП40-10-3-27

Таблица 1.5 – Характеристики двигателя ДП40-10-3-27

Наименование двигателя	U, В	P _{2 ном} , Вт	n _{ном} , об/мин	M _{ном} , мН·м	M _п , мН·м	I _{ном} , А	m, кг	J · 10 ⁻⁷ , кг · м ²
ДП40-10-3-27	27	16	3000	3,25	10	0,67	0,32	85

Поворот осуществляется лишь на угол, равный 90 градусов, крайние положения определяются двумя концевыми датчиками.

1.4 Механизм горизонтального перемещения вдоль оси Y

Механизм горизонтального перемещения вдоль оси Y также состоит из привода, зубчатой передачи и шарико-винтовой пары. Исполнительным органом является двигатель постоянного тока ДП40-10-3-27, параметры которого представлены в таблице 1.5. Зубчатая передача состоит из двух косозубых зубчатых передач, представленных на рисунке 1.8. Параметры зубчатых колес приведены в таблице 1.6. Параметры ШВП приведены в таблице 1.7.



Рисунок 1.8 – Косозубая зубчатая передача

Таблица 1.6 – Характеристики косозубой зубчатой передачи

Зубчатое колесо	Модуль	Число зубьев
Верхнее	0,5	80
Нижнее	0,5	80

Таблица 1.7 – Характеристика винта ШВП

Шаг, мм	Диаметр выступов, мм	Диаметр впадин, мм	Длина резьбы, мм	Ширина выступа, мм
4,5	12	10	343	2

1.5 Механизм подъема по оси Z

В движение механизм приводит привод, содержащий в качестве исполнительного органа два двигателя ДП40-10-3-27, связанные через зубчатую передачу. Механизм подъема закреплен на переднем конце ползуна механизма горизонтального перемещения по оси Y и состоит из корпуса цилиндрической формы, в котором расположена штанга, перемещающаяся в шариковой втулке, закрепленной на нижнем конце механизма подъема. Момент с выходного вала зубчатой передачи преобразуется шариковинтовой парой в поступательное движение. Параметры ШВП приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Параметры винта ШВП

Шаг, мм	Диаметр выступов, мм	Диаметр впадин, мм	Длина резьбы, мм	Ширина выступа, мм
4,5	12	10	220	2

1.6 Механизм захватного устройства

Механизм захватного устройства состоит из двух схватов и устройства ротации схватов. Исполнительным органом устройства ротации является пневмоцилиндр, управляемый распределителем электропневматическим, представленным на рисунке 1.9, с питающим напряжением 24 В. Скорость поворота регулируется дросселями. Устройство оснащено двумя концевыми датчиками. Угол поворота устройства - 90 градусов.

Механизм захвата детали закреплен на нижнем конце штанги механизма подъема по оси Z и состоит из двух схватов. Оба схвата расположены относительно друг друга под углом 90 градусов и закреплены к подвижному корпусу. Для каждого из них исполнительным органом является пневмоцилиндр, управляемый электропневматическим цилиндром с напряжением 24 В. Ротация корпуса происходит вокруг оси, расположенной под углом 45 градусов к вертикальной оси штанги.



Рисунок 1.9 – Распределитель электропневматический

Каждый схват оснащен тремя кулачками, закрепленными на ползунах с зубчатыми рейками. Перемещение кулачков осуществляется от пневмоцилиндра, шток которого через червяк и червячное колесо связан с зубчатыми рейками ползуна.

Блок подготовки воздуха, представленный на рисунке 1.10, предназначен для очистки, насыщения парами масла и регулирования давления поступающего из магистрали сжатого воздуха. Для очистки воздуха применяется фильтр – влагоотделитель. Для насыщения маслами воздуха применяется масленка. Регулирование давления осуществляется с помощью регулятора давления сжатого воздуха. Для подачи сжатого воздуха применяются два пневмораспределителя.



Рисунок 1.10 – Блок подготовки воздуха

2 Описание системы управления

2.1 Внешний вид системы управления робота НЦТМ-01

Объектом управления является робот НЦТМ-01, имеющий пять степеней свободы. Система управления должна обеспечивать полноценное управление объектом с учетом выполнения требований по безопасности. Данную систему управления, представленную на рисунке 2.1, можно разделить на 6 блоков.

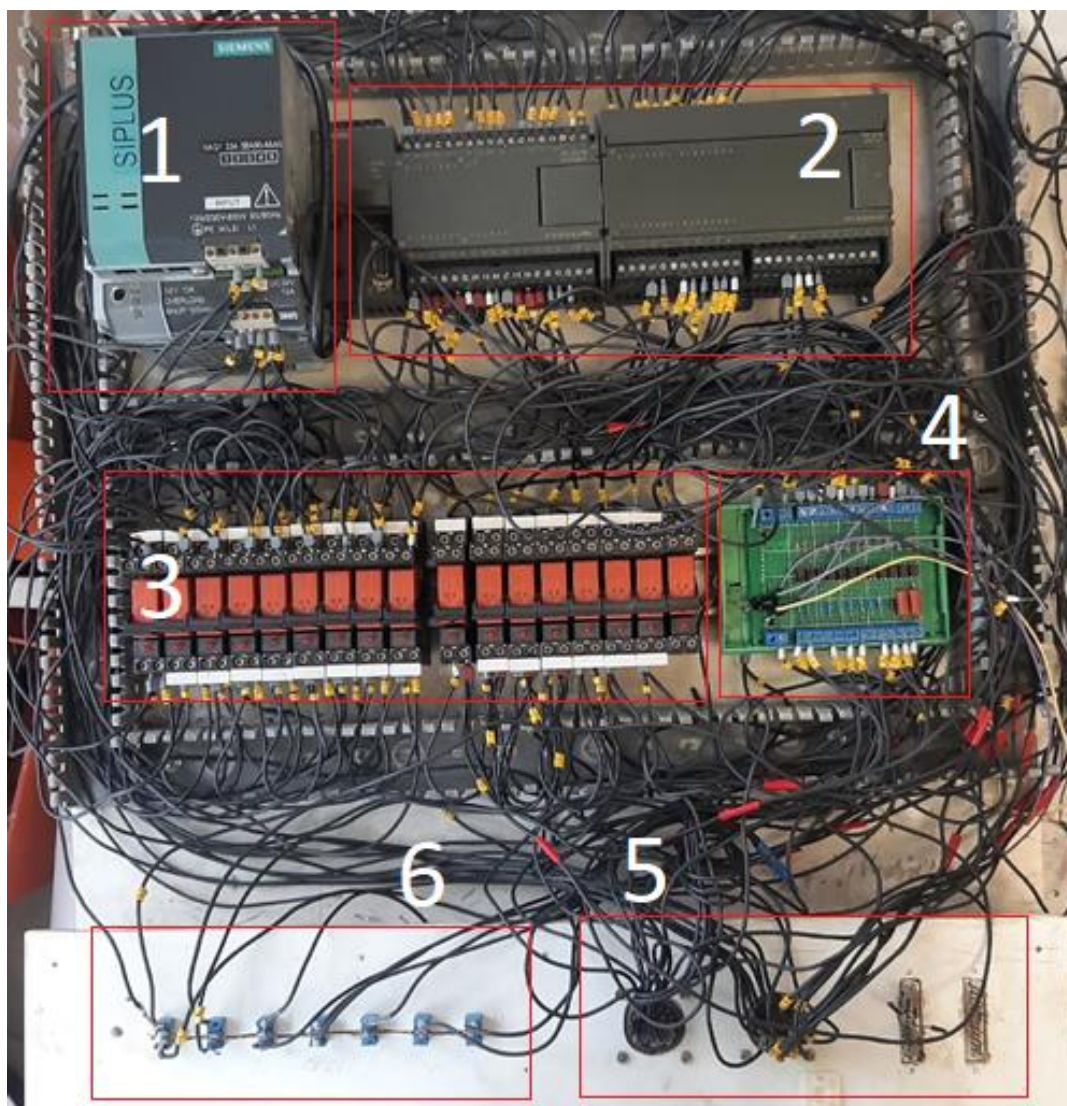


Рисунок 2.1 – Внешний вид системы управления на основе ПЛК S7-200

Первый блок – это преобразователь с 220 В переменного напряжения в постоянное напряжение 24 В. Осуществляет питание всех компонентов системы управления.

Второй блок – это непосредственно центральный процессор контроллера CPU224XP и модуль ввода-вывода дискретных сигналов DC24V.

Третий блок – это релейный блок, состоящий из 16 реле. Данный блок используется с целью механической защиты, обеспечивающий обрывание цепи питания и подачи питания на приводы робота. Хотя подача сигналов и регулируется программным образом, в некоторых нештатных ситуациях может возникнуть необходимость в реле, чтобы не допустить подачи лишнего напряжения, например, на датчики.

Четвертый блок – это схема преобразователь DC/DC с 24В на 5В. Он используется для подачи напряжения на датчики и получения сигналов с датчиков.

Пятый блок – два кабеля, подводящие провода к роботу. Один кабель содержит провода, питающие приводы, второй – питающий датчики.

Шестой блок – тумблеры ручного управления, позволяющие активировать входа контроллера для управления роботом.

2.2 Описание промышленного контроллера S7-200

Программируемые контроллеры семейства S7-200 имеют модульную конструкцию и являются идеальным средством для построения относительно простых систем автоматического управления при минимальных затратах на приобретение оборудования и разработку системы. Они способны работать в реальном масштабе времени и могут быть использованы для построения узлов локальной автоматики или узлов комплексных систем управления. Контроллеры обеспечивают поддержку обмена данными через сети PPI, MPI, Industrial Ethernet, а также через Интернет/ Интранет и системы модемной связи, способны работать в составе систем распределенного ввода-вывода на основе сетей AS-Interface и PROFIBUS DP [5].

Контроллеры S7-200 позволяют решать широкий спектр задач управления. От замены простых релейно-контактных схем до построения автономных систем управления или создания интеллектуальных устройств систем распределенного ввода-вывода.

Центральным процессором контроллера ПЛК является CPU224XP, который представлен на рисунке 2.2, имеющий 14 цифровых входов и 10 цифровых выходов, 2 аналоговых входа и 1 аналоговый выход. Имеются два порта связи: 2 RS-485 с поддержкой PPI.



Рисунок 2.2 – Модуль расширения входа-выхода EM 223

Модуль ввода-вывода дискретных сигналов, представленный на рисунке 2.3, позволяет увеличить количество дискретных входов и выходов, обслуживаемых одним центральным процессором S7-200. В его функции входит: преобразование входных дискретных сигналов контроллера в его логические сигналы, используемые центральным процессором S7-200.



Рисунок 2.3 – Модуль расширения входа-выхода ЕМ 223

2.3 Описание релейного блока

В соответствии с техническими данными электронной системы согласующие реле имеют небольшую потребляемую мощность. Данный релейный блок состоит из 16 реле, в нем используются двухконтактные реле, представленные на рисунке 2.4, позволяющие переключать при подачи управляющего напряжения две независимые цепи.



Рисунок 2.4 – Внешний вид реле

Данное реле может использоваться как нормально-замкнутое или как нормально-разомкнутое в зависимости от подключения. Электрическая цепь коммутации представлена на рисунке 2.5. Контактные зажимы коммутационных элементов и контактные зажимы катушки расположены с разделением на разных уровнях, например, коммутационные элементы вверху, катушки – внизу. Благодаря надежной гальванической развязки возможно управление за счет ПЛК и предотвращается переход напряжения из одной цепи тока в другую.

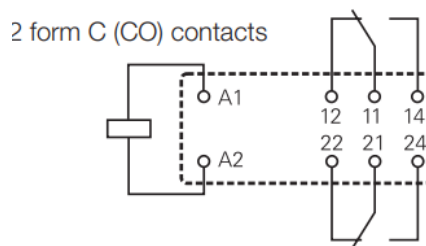


Рисунок 2.5 – Коммутирующая электрическая цепь реле

2.4 Описание блока преобразователя

В качестве преобразователя изначально использовался понижающий DC-DC преобразователь LM2596, представленный на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Внешний вид преобразователь

Для обеспечения гальванической развязки между 24В и 5В используются оптроны РС817 и сопротивления, ограничивающие потребляемые токи. Схема подключения представлена на рисунке 2.7.

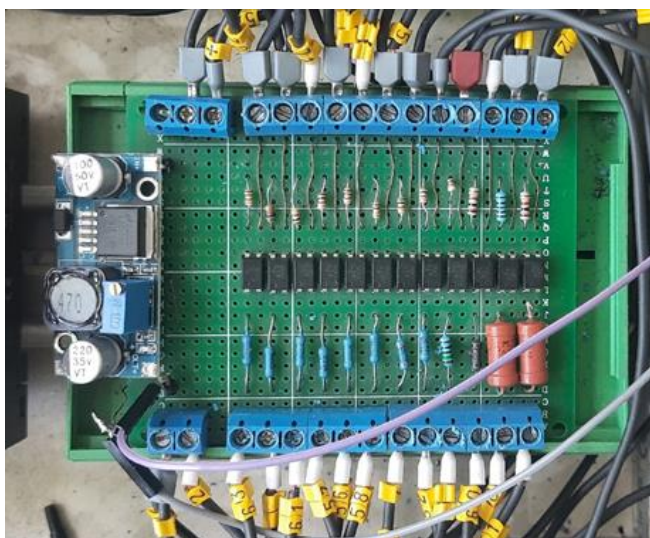


Рисунок 2.7 – Схема подключения блока преобразователя

Важным критерием работы преобразователя является срабатывание оптопары при подаче напряжения от 1,5 В. Именно такое напряжение выдают датчики при срабатывании, и для активации контроллера данное напряжение должно быть преобразовано в 24 В.

Основной трудностью, не позволяющей произвести точное измерение перемещения робота, являлось падение напряжения в схеме преобразователя. С целью устранения данного эффекта была удалена часть релейного блока, отвечающая за механическое ограничение движения при срабатывании датчиков. Данная часть релейной схемы была избыточна, поскольку обработка информации с датчиков происходит программным путем.

Изначально робот НЦТМ-01 был разработан с собственными оптическими датчиками, но, как показал опыт использования робота, напряжения выходного сигнала с датчиков было неустойчивым, наблюдалось рассогласование сопротивлений между цепями 5В и 24В, разделенных оптронами, в следствие чего сигнал с импульсных датчиков преобразовывался с разным напряжением и контроллер не всегда правильно определял сигнал срабатывания датчиков. С целью устранения данных недостатков было принято решение о замене датчиков на более современные и менее габаритные. Новым используемым датчиком является датчик НС89, представленный на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Датчик НС-89

Характеристики датчика [6]:

- напряжение питания: 3,3 В – 5В;
- ширина паза датчика: 5 мм;
- тип выхода: цифровой;
- используемый компаратор: LM393;
- размеры модуля: 25,65 x 20 x 12 мм;
- ток потребления: 14 мА;

При подключении данного датчика к осциллографу наблюдается форма импульсов лучше, чем у предыдущих датчиков, которые принимали напряжение строго 3,3В и 0В. Для новых датчиков были разработаны и напечатаны кронштейны, а для дальнейшего использования в лабораторных целях датчики могут легко быть заменены и сняты с робота без пайки.

Помимо этого, в схему преобразователя добавлен микроконтроллер Arduino Mega 2560 в качестве еще одного управляющего устройства, который представлен на рисунке 2.9.

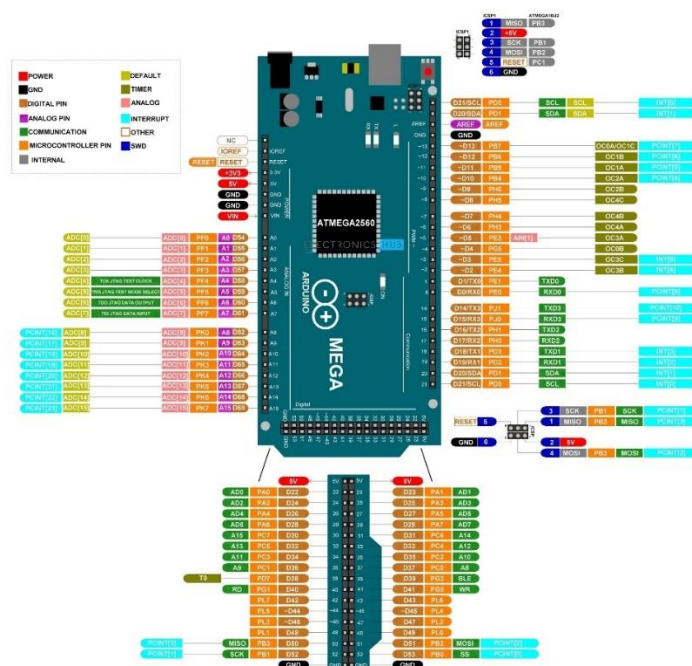


Рисунок 2.9 – Микроконтроллер Arduino Mega 2560

В таблице 2.1. представлено описание основных параметров микроконтроллера:

Таблица 2.1 – Параметры Arduino Mega

Параметр	Значение
Рабочее напряжение, В	5
Входное напряжение, В	7 - 12
Ограничение на входное напряжение, В	6 - 20
Цифровые I/O входы	54 (14 из которых поддерживают ШИМ)
Аналоговые I/O входы	16
Ток для I/O входов, мА	50
Flash память, кБт	256
SRAM, кБт	8
Тактовая частота, МГц	16

3 Разработка и описание принципиальных схем в EPLAN Electric и КОМПАС 3Д

Создание общих принципиальных схем является важной частью в процессе проектирования, монтажа и изучения системы управления. Целью создания принципиальных схем является представление системы управления в виде схем, содержащих условно-графические элементы и обозначения, где указаны нумерация элементов и порядок их взаимодействия между собой. Все схемы приведены в перечне графического материала. На основе данных схем в дальнейшем оператор в полной мере будет обладать информацией о системе управления при разработке собственных управляющих программ. Для создания

принципиальных схем использовались программы EPLAN Electric P8 и КОМПАС-3D.

Питание на систему управления подается с общей сети питания переменного напряжения через розетку. На схеме подключения ПЛК розетка подключена к блоку питания через фазный провод L и нулевой провод N. Блок питания преобразует 220 В переменного напряжения в 24 В постоянного напряжения. На выходе блока питания четыре клеммы, две из которых с положительным потенциалом, а две – с отрицательным. Фазный и нулевой провод также подводятся к ПЛК в качестве питания, а в качестве общей точки к ПЛК подводится провод с клеммы «–». Описание адресов контроллера приведено на схеме. Данный контроллер является устройством, подающим сигналы управления. Выходы ПЛК Q0.0 – Q1.1 подключены к релейному блоку в качестве размыкателей реле. Входа ПЛК принимают сигналы с конечных датчиков в качестве обратной связи, на основе которых программным путем ограничивается подача напряжения на приводы.

На схеме подключения модуля расширения ПЛК модуль расширения EM223 связан с основным контроллером с помощью шины, добавляя количество дискретных входов и выходов. Питание модуля подводится от блока питания, обозначение входных и адресов приведено на схеме. Для управления в ручном режиме система управления оснащена тумблерами. Первый тумблер определяет выбор управления: с Arduino или без, его контакты подключены к контактам активации реле. Если выбрано управление без Arduino, активация релейного блока не происходит, и в таком случае все остальные тумблеры подключены к входам контроллера, тем самым управляя входными адресами. Если тумблер переключен, то реле переключает цепь, к которой подключены выходы Arduino, и управления ведется с микроконтроллера. Данная система позволяет разграничить управления тумблерами и через Arduino, не вызывая взаимного влияния.

Схема подключения Arduino и преобразователей обеспечивает как управление роботом, так и обратную связь. Преобразователь выходных сигналов с датчиков робота преобразует напряжение, подаваемое с блока питания, в 5 В постоянного напряжения. В схеме преобразователя выходных сигналов приведено устройство преобразователя, который состоит из преобразователя напряжения, оптронов и сопротивлений, ограничивающих ток. Таким способом обеспечивается гальваническая развязка. При поступлении положительного сигнала с датчика оптрон замыкает цепь 24В и активирует соответствующий вход ПЛК. Микроконтроллер Arduino питается с выхода преобразователя на 5В, а также подключается к персональному компьютеру для передачи данных. К пинам Arduino 2, 3 и 18 напрямую подключены выходы энкодеров, которые считывают положения звеньев. Это необходимо для того, чтобы поступающие сигналы обрабатывались в прерывании. Преобразователь управляющих команд служит для активации входов ПЛК тем же способом, что и преобразователь выходных сигналов. К преобразователю подключаются пины, на каждом из

котором подается управляющий сигнал с Arduino. Все пины, используемые с Arduino, являются дискретными.

Схема подключения приводов поступательных звеньев относится уже к объекту управления – роботу. Для передачи сигналов с системы управления имеется кабель, обозначенный как ХТ2. Кабель ХТ2 служит для передачи всех управляющих сигналов с ПЛК, которые поступают на приводы. Использование релейного блока обеспечивает реверсивное управление двигателями привода. У всех трех звеньев поступательного движения одинаковые приводы, контакты которых подведены к кабелю ХТ2. С выходов кабеля на приводы нумерация проводов меняется, согласно документации ПР НЦТМ-01. Активация тормоза привода происходит через управляющую команду непосредственно с ПЛК без реле.

На схеме подключения датчиков звеньев поступательного движения изображен кабель ХТ1, которые отвечает за передачу сигнала с системы управления к роботу. Все датчики имеют одинаковое устройство, поэтому питание на них подается с проводов 100 и 105. Выходы датчиков подключаются через кабель непосредственно к блоку преобразователя выходных сигналов кроме трех датчиков.

На принципиальной схеме механизма вращения представлено подключение привода, которым является двигатель постоянного тока, и датчиков. Данные датчики отличаются от тех, что используются в звеньях поступательного движения, являясь магнитоуправляемыми. Звено содержит 2 пневмораспределителя, которые управляются командами сжатия захвата. Управляющие команды на пневмораспределитель подаются от ПЛК без реле.

На схеме механизма захвата представлена схема одного захвата, где используется еще один кабель - ХТ3. Это сделано для удобства, поскольку захват расположен достаточно далеко от системы управления от контроллера. У захвата есть два датчика, определяющие, в сжатом или разжатом состоянии находится захват.

На пневматической принципиальной схеме представлено система подачи сжатого воздуха на механизмы схвата. Сначала воздух обрабатывается в блоке подготовки воздуха А1, затем подается на три пневматических распределителя. Механизм захвата состоит из поршня со штоком, который смещается при подаче сжатого воздуха. Выдвигаясь, поршень вращает червяк, который через реечную передачу преобразует вращательное движение в поступательное. К реечной передаче закреплены кулачки, которые выдвигаются вместе с рейкой.

Третий пневматический распределитель является двухпозиционным и обеспечивает ротацию схвата при подаче сжатого воздуха. Для гашения ударной энергии используются два дросселя.

Таким образом данная система управления обеспечивает:

- управление движением по оси X;
- управление движением по оси Y;
- управление движением по оси Z;
- управление поворотом звена робота;

- управление первым схватом;
- управление вторым схватом;
- управление ротацией схватов.

Данные принципиальные схемы являются основой лабораторного практикума, который представлен в ПРИЛОЖЕНИИ А.

4 Разработка модели робота НЦТМ-01 в MATLAB Simulink

4.1 Разработка модели привода робота

4.1.1 Моделирование двигателя постоянного тока

Главным исполнительным органом каждого звена за исключением схвата является электродвигатель, входящий в состав приводной системы робота. Прежде чем перейти к разработке компьютерной модели робота, необходимо провести моделирование двигателя с целью получения необходимого момента на валу, скорости и тока. Поскольку электродвигатель сочетает в себе как механическую, так и электрическую составляющие, то при его моделировании необходимо обеспечить правильную взаимосвязь между параметрами якорной цепи и выходным моментом. Удобным и эффективным инструментом является программная среда MATLAB Simulink, содержащая в себе библиотеку Simscape, в которой возможно моделирование и электрической цепи, и механического взаимодействия.

В роботе НЦТМ-01 всего применяется два разных двигателя постоянного тока, поэтому необходима разработка двух моделей, отличающихся лишь параметрами двигателей, представленными в таблице 1.1 и 1.3. Для моделирования якорной цепи используется библиотека Simscape Electrical, содержащая в себе модели полупроводников, двигателей и компоненты для управления электромеханическими системами [7].

Основным блоком, отвечающим за преобразование электрической энергии в механическую, является блок Rotational Electromechanical Converter, представленный на рисунке 4.1.

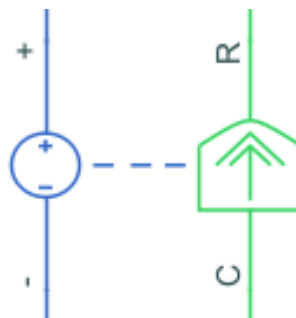


Рисунок 4.1 – Внешний вид блока Rotational Electromechanical Converter

Данный блок дает математическое описание двигателя на основе двух уравнений:

$$U_a = k \cdot \omega, \quad (4.1)$$

$$M = k \cdot I_a, \quad (4.2)$$

где M – момент на валу двигателя;

I_a – ток якоря;

U_a – напряжение якоря;

ω – угловая скорость;

k – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент k определяется по формуле:

$$k = \frac{I}{M} = \frac{0.013 \text{ A}}{0.3 \text{ Нм}} = 0,043 \frac{\text{В}}{\frac{\text{рад}}{\text{с}}}. \quad (4.3)$$

Параметры, занесенные в блок Rotational Electromechanical Converter, представлены на рисунке 4.2.

NAME	VALUE	
Parameters		
> Constant of proportionality K	0.043	V/(rad/s)
Initial Targets		
Nominal Values		
Current		
Value	0.3	A
Voltage		
Value	27	V
Torque		
Value	0.013	N*m
Angular velocity		
Value	3000	rpm

Рисунок 4.2 – Номинальные параметры двигателя постоянного тока

Якорная цепь двигателя обязательно содержит активное и реактивное сопротивление. Активное сопротивление якоря определяется как:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} = \frac{27 \text{ В}}{0.3 \text{ А}} = 90 \text{ Ом}. \quad (2.4)$$

Индуктивность якоря определяется как [8]:

$$L_a = \frac{30 \cdot U_a \cdot c}{\omega_a \cdot I_a \cdot \pi} = \frac{30 \cdot 27 \text{ В} \cdot 0,35}{3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \cdot 0.3 \text{ А} \cdot 3,14} = 0,1 \text{ Гн}, \quad (2.5)$$

где c – эмпирический коэффициент в диапазоне от 0,3 до 0,4.

Блок Inertia, представленный на рисунке 4.3, определяет момент инерции вала, который является известным параметром.



Рисунок 4.3 – Внешний вид блока Inertia

Передача вращательного движения осуществляется с помощью момента, создаваемого на валу двигателя. Для измерения этого используется блок Ideal Torque Sensor, представленный на рисунке 4.4, которые передает физический сигнал, пропорциональный моменту.

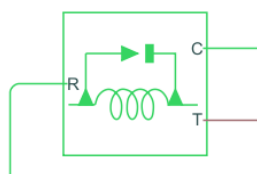


Рисунок 4.4 – Внешний вид блока Ideal Torque Sensor

Питание двигателя осуществляется напряжением 24,5 В, которое соответствует напряжению, подаваемому на привод реального объекта управления. Общая модель двигателя постоянного тока имеет вид, представленный на рисунке 4.5.

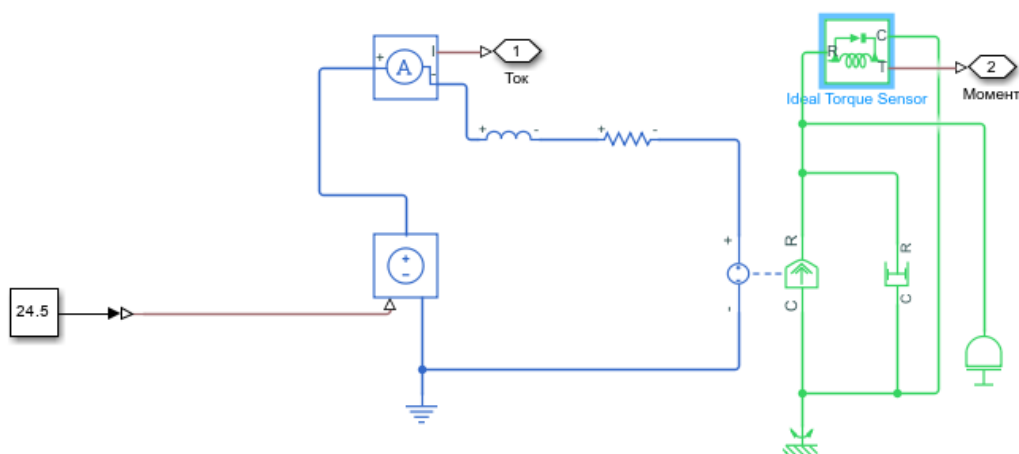


Рисунок 4.5 – Общая модель двигателя постоянного тока

В результате моделирования двигателя получены параметры при питающем напряжении 24,5 В. График скорости представлен на рисунке 4.6, график момента на валу представлен на рисунке 4.7, график тока якоря представлен на рисунке 4.8.

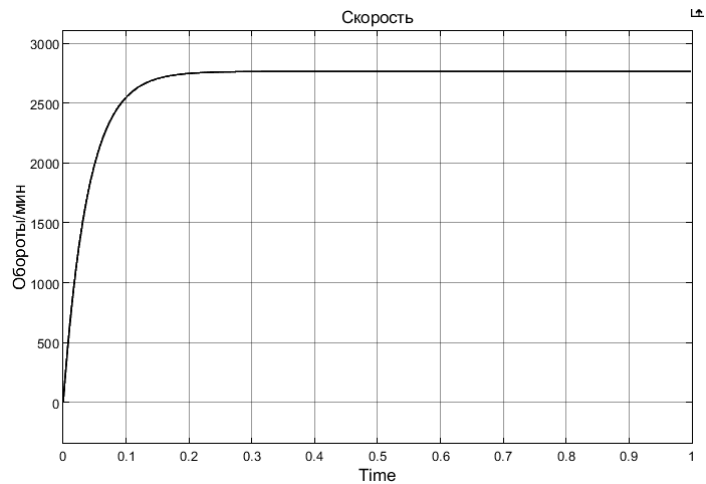


Рисунок 4.6 – График скорости вала двигателя

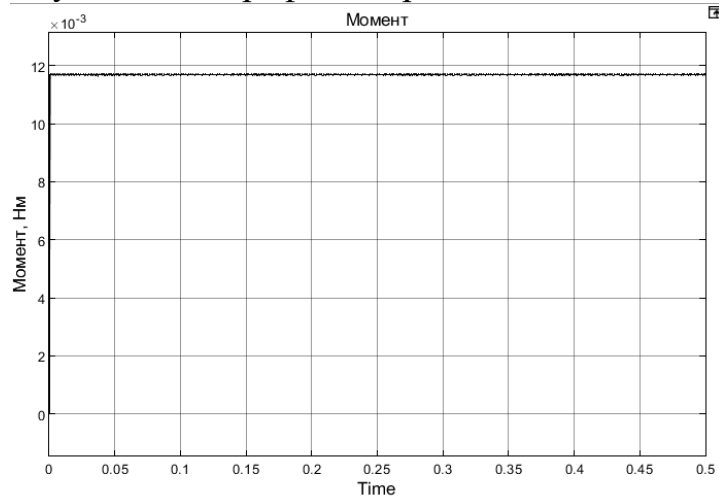


Рисунок 4.7 – График момента на валу двигателя

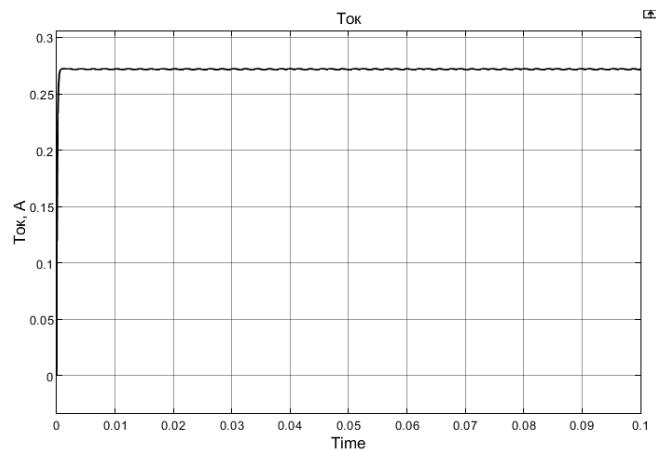


Рисунок 4.8 – График тока якоря двигателя

По графикам видно, что измеренные значения параметров двигателя при напряжении 24,5 В приближаются к номинальным значениями при 27 В, заданных в параметрах двигателя.

4.1.2 Моделирование зубчатой передачи привода с помощью Simscape Multibody

Зубчатая передача привода состоит из трех зубчатых колес, два из которых расположены на валах двигателей, а одно – между ними. Для реализации компьютерной модели зубчатой передачи используется библиотека Simscape Multibody.

Важнейшим блоком в Simscape Multibody является File Solid, представленный на рисунке 4.9. В данный блок импортируются STEP файлы из CAD системы SolidWorks. Simscape Multibody основан на взаимодействии объектов на основе их систем координат, каждая из которых привязана к мировой системе координат. С системами координат связаны и оси моментов инерции, которые могут быть определены автоматически из геометрии объекта, если известны плотность или масса объекта, или могут быть записаны вручную. К параметрам, определяющим инерцию, относятся: масса, координаты центра масс, основные моменты инерции и вспомогательные моменты инерции, представленные на рисунке 4.10. Программа Solidworks позволяет импортировать вместе с файлом структуру данных smiData.Solid, содержащую всю информацию об инерции объекта.



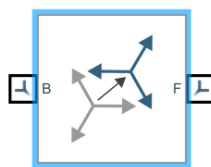
File Solid

Рисунок 4.9 – Блок File Solid

Geometry					
File Name	C:\Users\Egor\Desktop\НИР\зубчатые колеса\Matlab\RE...				
Unit Type	From File				
Export					
Inertia					
Type	Custom				
Mass	smiData.Solid(8).mass	kg	▼	Compile-time	▼
Center of Mass	smiData.Solid(8).CoM	mm	▼	Compile-time	▼
Moments of Inertia	smiData.Solid(8).Mol	kg*mm^2	▼	Compile-time	▼
Products of Inertia	smiData.Solid(8).Pol	kg*mm^2	▼	Compile-time	▼
Graphic					
Frames					

Рисунок 4.10. – Параметры инерции объекта

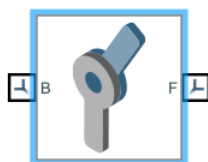
Перемещение и вращение в пространстве системы координат осуществляется благодаря блоку Rigid Transform, представленному на рисунке 4.11. Блок Rigid Transform задает и поддерживает фиксированное пространственное соотношение между двумя кадрами во время моделирования.



Rigid
Transform

Рисунок 4.11 – Блок Rigid Transform

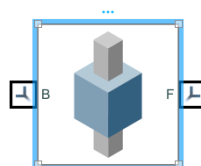
Блок Revolute Joint, представленный на рисунке 4.12, моделирует соединение, имеющее одну степень свободы и обеспечивающее вращение вокруг оси Z. Данный блок имитирует поведение вращательного сочленения реального объекта, может управляться по моменту или по положению, измерять положение, ускорение, скорость и момент. Поведение сочленения определяется коэффициентами упругости и демпфирования, возможно ограничение перемещения на заданный угол.



Revolute Joint

Рисунок 4.12 – Блок Revolute Joint

Для обеспечения поступательного движения используется блок Prismatic Joint, представленный на рисунке 4.13. Данный блок имитирует поведение поступательного сочленения реального объекта, может управляться по силе или по положению, замерять положение, ускорение, скорость и момент. Имеет те же параметры, что и Revolute Joint.



Prismatic
Joint

Рисунок 4.13 – Блок Prismatic Joint

Для моделирования зубчатого зацепления и передаточного отношения используется блок Common Gear Constraint, представленный на рисунке 3.14.

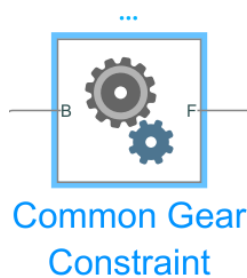


Рисунок 4.14 – Блок Common Gear Constraint

В параметрах данного блока указывается вид зубчатого зацепления – внешний или внутренний, определяется расстояние между центрами осей зубчатых колес, диаметры делительных окружностей и задается передаточное отношение [9]. Задание параметров для двух зубчатых представлено на рисунке 4.15.

NAME	VALUE		
Type	External		
Specification Method	Center Distance and Ratio		
Center Distance	20	mm	Compile-time
Gear Ratio (Nf/Nb)	60/20	3	Compile-time

Рисунок 4.15 – Параметры блока Common Gear Constraint

Так как привод включает в себя три зубчатых колеса, то необходимо использовать два блока Common Gear Constraint. Общая модель зубчатой передачи представлена на рисунке 3.16. К данной модели подводится момент от двух двигателей, однако из-за того двигатели одинаковые и моменты на них равны, то момент будет подводиться с ранее разработанной модели двигателя постоянного тока. Общая модель привода двигателя представлена на рисунке 4.17. Визуализация работы модели и вращения зубчатых колес представлена на рисунке 4.18.

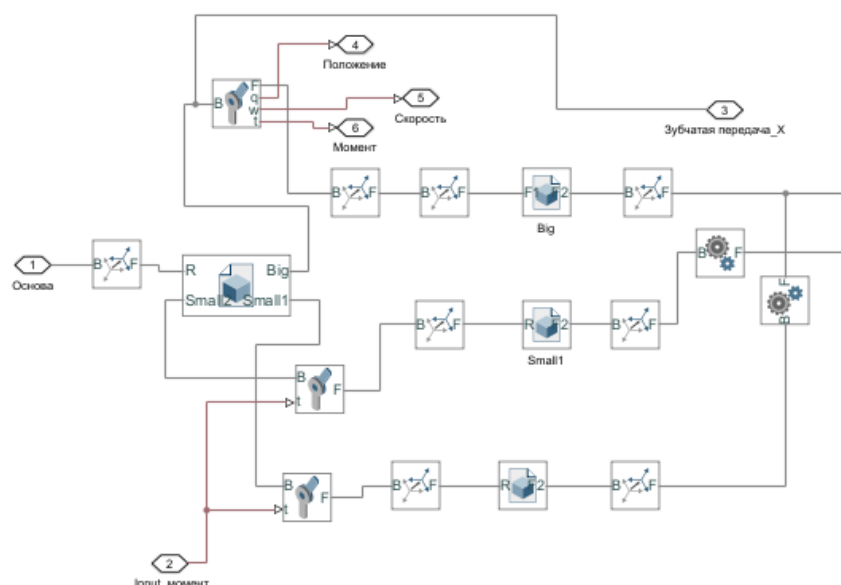


Рисунок 4.16 – Общая модель зубчатой передачи привода

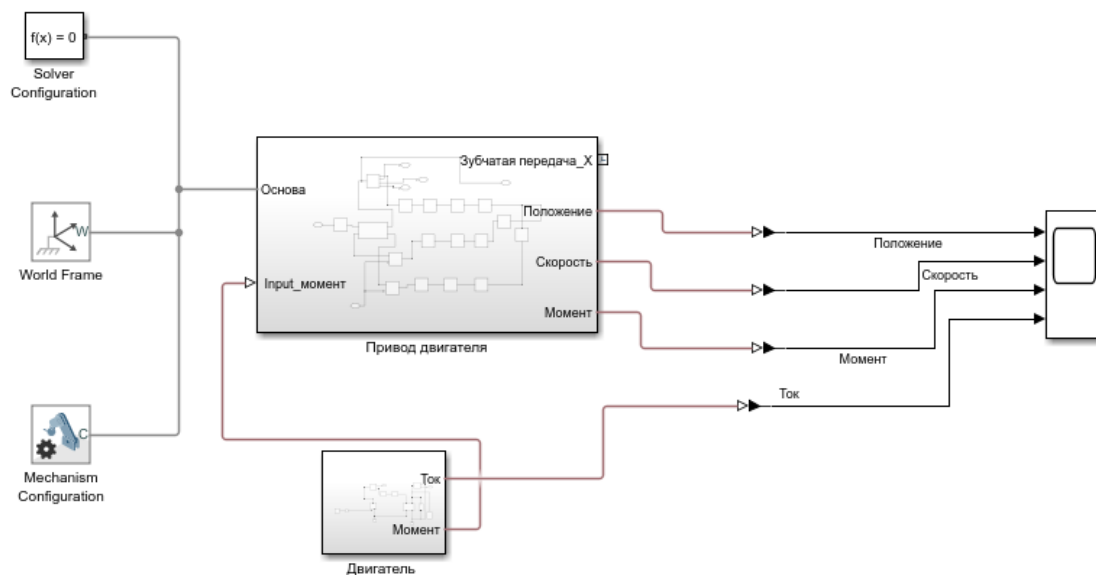


Рисунок 4.17 – Общая модель привода робота НЦТМ-01

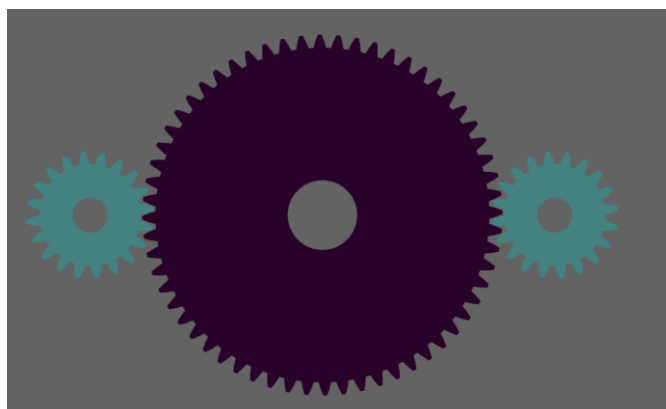


Рисунок 4.18 – Визуальное представление модели

В результате моделирования привода может быть измерена угловая скорость на валу центрального зубчатого колеса. График скорости представлен на рисунке 4.19. Из графика видно, что зубчатая передача понизила скорость оборотов выходного вала и изменила направление вращения выходного вала.

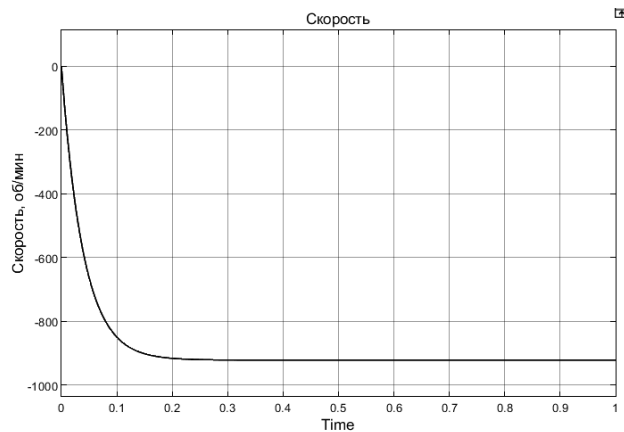


Рисунок 4.19 – График скорости выходного вала привода

4.1.3 Моделирование зубчатой передачи привода с помощью Simscape Mechanical

Недостатком моделирования зубчатой передачи привода в Simscape Multibody является невозможность получения момента сил на выходному валу привода, поскольку блок Common Gear Constraint не влияет на блок Revolute Joint, в котором измеряются силы и моменты, он влияет лишь на изменение вращения системы координат зубчатого колеса. С целью получения момента сил с выходного вала привода используется Simscape Mechanical, где непосредственно к механической части двигателя добавляются блоки передаточного отношения зубчатых колес.

Блок Gear Box, представленный на рисунке 4.20, является идеальной, не планетарной, фиксированной передачей, характеризующаяся исключительно передаточным отношением. Порт R – это механическое вращение входного вала, порт С – механическое вращение выходного вала. Передаточное отношение определяется как отношением угловой скорости входного вала к выходному валу.

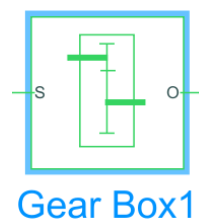


Рисунок 4.20 – График скорости выходного вала привода

Добавив данный блок в схему с двигателем постоянного тока и умножив момент на 2, поскольку у нас два двигателя обеспечивают вращение, получим численное значение момента на выходном валу. График момента представлен на рисунке 4.21.

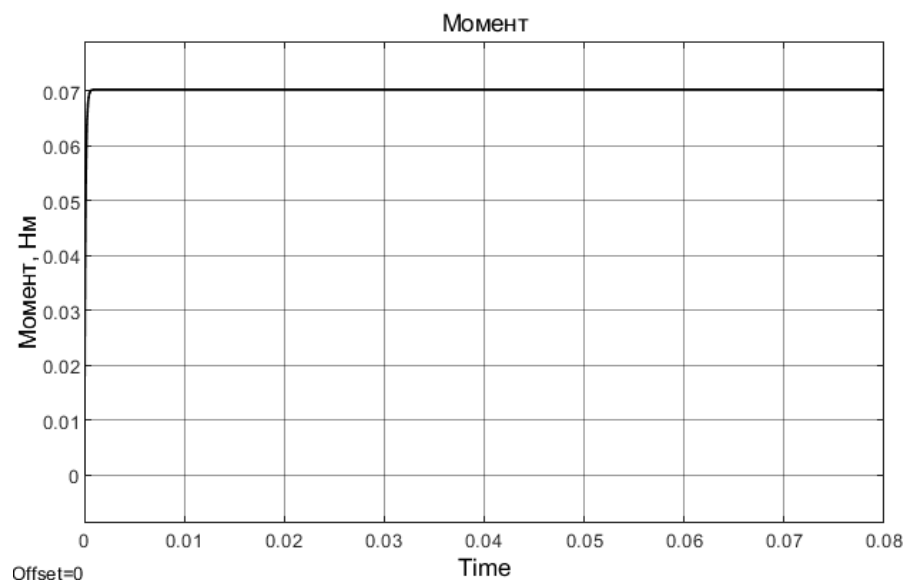


Рисунок 4.21 – Момент на выходном валу привода

4.2 Разработка пневмосистемы в системе MATLAB Simulink

4.2.1 Моделирование пневмосистемы ротации захвата

Блок Gas Properties, внешний вид которого представлен на рисунке 4.22, обеспечивает настройку параметров газа в газовой сети. Газ моделируется как идеальный, полуидеальный или реальный. В качестве упрощенной модели газ выбран в качестве идеального. Воздух считается сухим [10].



Рисунок 4.22 – Внешний вид блока Gas Properties

Для моделирования резервуара используется блок Reservoir, внешний вид которого представлен на рисунке 4.23. Этот блок устанавливает постоянные граничные условия в пневмосети. Объем газа внутри резервуара считается бесконечным, следовательно, поток воздуха – квазистационарным.

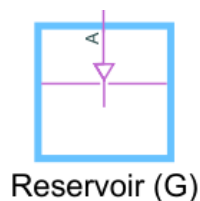


Рисунок 4.23 – Внешний вид блока Reservoir

Блок Pressure Source, внешний вид которого представлен на рисунке 4.24, является источником давления.

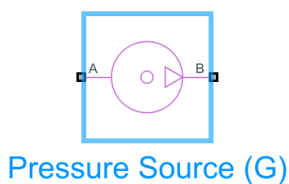


Рисунок 4.24 – Внешний вид блока Pressure Source

На входе А и выходе В обеспечивается разность давления, которая позволяет осуществлять переход механической энергии в газовой системе. Рабочее давление робота НЦТМ, подаваемое в магистрали, равняется 6 атм.

Блок 4-Way Directional Valve (G) моделирует работу двухпозиционного четырехходового пневмораспределителя, внешний вид блока представлен на рисунке 4.25.

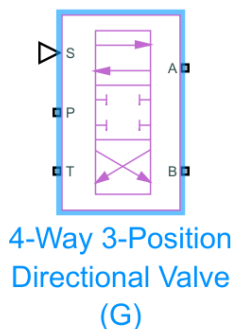


Рисунок 4.25 – Внешний вид блока 4-Way Directional Valve (G)

Блок представляет собой клапан с четырьмя газовыми отверстиями (Р, А, В Т) и четырьмя возможными путями потока: Р–А, Р–В, А–Т и В–Т. Вход Р отвечает за подачу воздуха, вход Т – за сток воздуха. Каждый из путей проходит через отверстие переменной ширины. Входной сигнал, указанный в порту S, управляет положением золотника, изменяется от –1 до 1. Если сигнал на золотнике –1, то открыты потоки Р–А и В–Т, если сигнал золотника 0, то все потоки закрыты, если сигнал равен 1, то открыты потоки Р–В и В–Т [11]. Пример положения клапанов в зависимости от значения S представлен на рисунке 4.26.

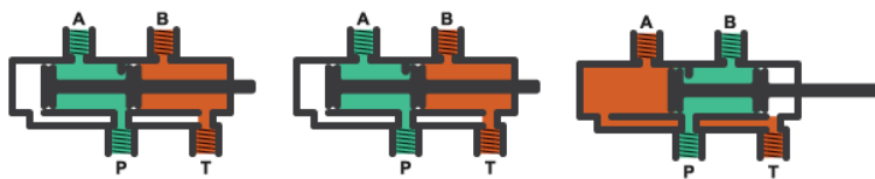


Рисунок 4.26 – Положения клапанов: а) при $S = -1$; б) при $S = 0$ в) при $S = 1$

Параметры блока 4-Way Directional Valve (G) представлены на рисунке 4.27.

Parameters		
Valve parameterization	Sonic conductance	
Opening characteristic	Linear	
> Maximum sonic conductance	12	l/(bar*s)
> Critical pressure ratio	0.3	
> Subsonic index	0.5	
> ISO reference temperature	293.15	K
> ISO reference density	1.185	kg/m^3
> Leakage flow fraction	1e-6	
> Smoothing factor	0.01	
> Laminar flow pressure ratio	0.999	
> Cross-sectional area at ports A, B, P, and T	0.01	m^2
Valve Opening Fraction Offsets		

Рисунок 4.27 – Параметры блока 3-Way Directional Valve (G)

В модели НЦТМ-01 необходимо три блока пневмораспределителя: один отвечает за ротацию схватов, два других — за выдвижение кулачковых механизмов. Четырёхходовой распределитель полностью обеспечивает перемещение и вращение схватов, используя всего один золотник и один управляющий сигнал.

Для преобразования газового потока в механическое вращение схвата используется блок Translational Mechanical Converter, этот блок моделирует интерфейс между газовой сетью и механической системой вращательного движения. Блок представлен на рисунке 4.28.

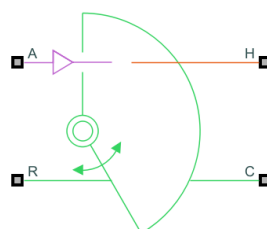


Рисунок 4.28 – Внешний вид блока Translational Mechanical Converter

Порт А — это порт для входа/выхода газа, связанный с входом преобразователя. Порт Н — это порт для сохранения тепла, связанный с тепловой массой объема газа. Порты R и C — это порты для сохранения механического перемещения, связанные с подвижным интерфейсом и корпусом преобразователя, соответственно. На рисунке 4.29 приведено окно задания параметров блока.

Parameters		
Mechanical orientation	Pressure at A causes positive rotation of R relative to C	
Interface rotation	Calculate from angular velocity of port R relative to port C	
Initial interface rotation	0	rad
Configurability	Compile-time	
Interface volume displacement	0.01	m ³ /rad
Configurability	Compile-time	
Dead volume	1e-5	m ³
Cross-sectional area at port A	0.01	m ²
Environment pressure specification	Atmospheric pressure	

Рисунок 4.29 – Окно параметров блока Translational Mechanical Converter

Для определения вращения используется параметр Mechanical Orientation, в котором выбирается вращение в положительном направлении или отрицательном. Для реализации вращения необходимо два блока Translational Mechanical Converter, один из которых будет обеспечивать вращение по часовой стрелке, второй – против часовой в зависимости от сигнала на золотнике.

Блок Temperature Source представляет собой идеальный источник энергии в тепловой сети, который может поддерживать постоянную абсолютную температуру на входе независимо от скорости теплового потока. Блок представлен на рисунке 4.30.



Temperature Source

Рисунок 4.30 – Внешний вид блока Temperature Source

Блок Convective Heat Transfer моделирует теплопередачу в тепловой сети посредством конвекции, обусловленной движением газа. Скорость теплопередачи пропорциональна разнице температур, коэффициенту теплопередачи и площади поверхности, контактирующей с газом. Блок представлен на рисунке 4.31.



Convective Heat Transfer1

Рисунок 4.31 – Внешний вид блока Convective Heat Transfer

Блок-схема модели пневмоуправления вращением схвата представлена на рисунке 4.32.

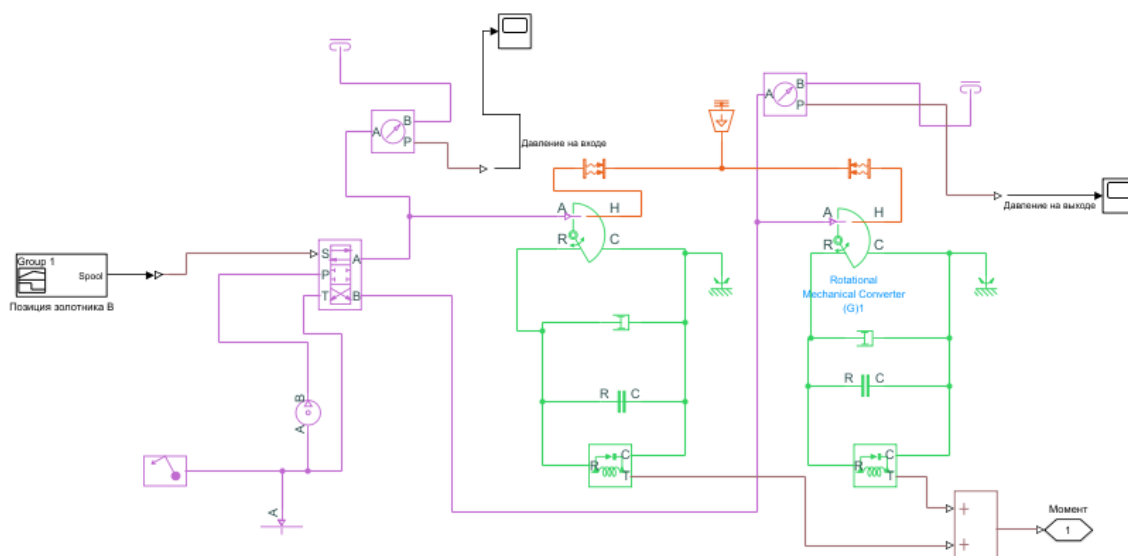


Рисунок 4.32 – Блок-схема модели пневмооборудования в MATLAB Simulink.

4.2.2 Моделирование пневмосистемы сжатия схвата

Для моделирования трехсекционного пневмоцилиндра используется блок Translational Mechanical Converter, этот блок моделирует интерфейс между газовой сетью и механической системой поступательного движения. Блок преобразует давление газа в механическую силу и наоборот, внешний вид блока представлен на рисунке 4.33.

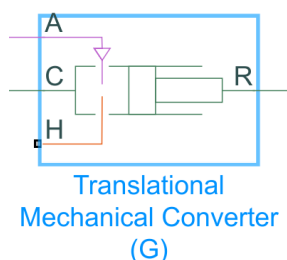


Рисунок 4.33 – Внешний вид блока Translational Mechanical Converter

Для моделирования трения в пневмоцилиндре используется блок Translational Damper, представленный на рисунке 4.34.



Рисунок 4.34 – Внешний вид блока Translational Damper

Блок Mass учитывает массу поршня. Примем массу поршня равно 0.3 кг. Блок представлен на рисунке 4.35.

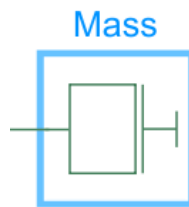


Рисунок 4.35 – Внешний вид блока Mass

На рисунке 4.36 представлена блок-схема модели пневмооборудования, отвечающее за поднятие схвата в MATLAB Simulink.

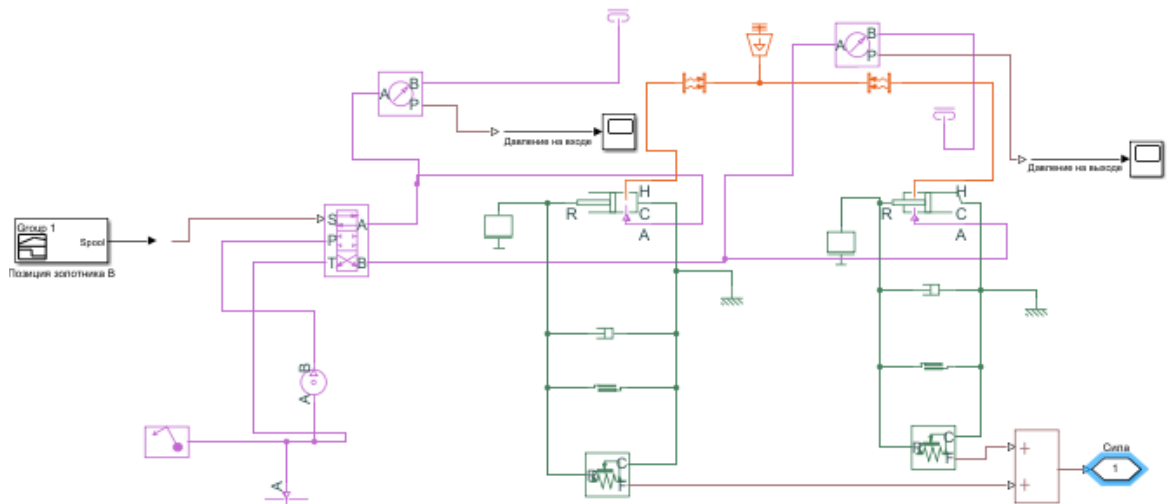


Рисунок 4.36 – Блок-схема модели в MATLAB Simulink

4.3 Сборка модели звеньев робота

После моделирования приводов двигателя и разработки пневмосистемы возможно моделирование звеньев робота НЦТМ-01. Моделирование звеньев будет основано на получении моментов сил из расчета механической части модели, которые будут приложены к сочленениям робота. Общая схема модели механизма перемещения вдоль оси X в Simulink представлена на рисунке 4.37.

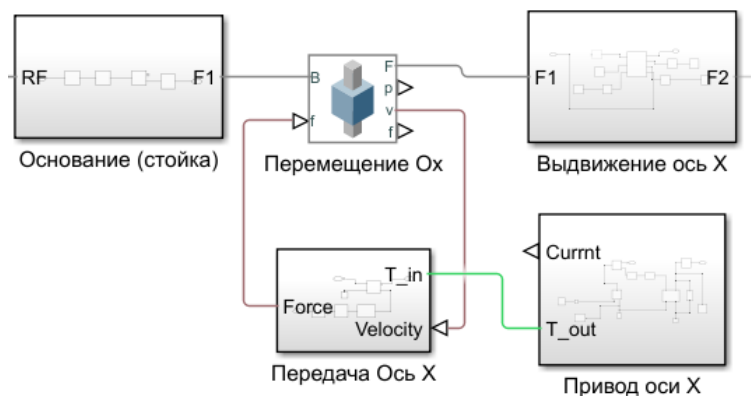


Рисунок 4.37 – Общая схема модель механизма перемещения вдоль оси X

Модель состоит из двух частей: моделирование движения модели робота НЦТМ-01 и моделирование задающих моментов в механической части. Данный механизм имеет зубчатую передачу из трех зубчатых колес и ШВП. Для моделирования ШВП применяется блок Leadscrew, который представлен на рисунке 4.38.



Рисунок 4.38 – Общая модель механизма перемещения вдоль оси X

Он преобразует вращательное движение в поступательное и наоборот. Основным параметром является шаг винта – это поступательное перемещение за один оборот. Имеется возможность добавления трения, учета КПД соединения винт-гайка и ограничений по мощности. Поскольку данный блок описывает именно соединение винт-гайка, то указываются параметры, характеризующие ШВП – это КПД соединения. В ШВП оно может равняться до 95%. Рисунок 4.39 показывает параметры ШВП, заданные в блоке Leadscrew.

NAME	VALUE
▼ Main	
> Screw lead (displacement per revolution)	4,5 mm
Screw helix type	Right-hand
▼ Meshing Losses	
Friction model	Constant efficiency
Friction parameterization	Efficiencies
> Screw-nut efficiency	0.95
> Nut-screw efficiency	0.95
> Power threshold	0.001 W
> Viscous Losses	

Рисунок 4.39 – Параметры ШВП

Блок Translational Multibody Interface, представленный на рисунке 4.40, преобразует поступательное движение с механической части схемы в силу, которая поступает уже на звено робота, выраженное с помощью библиотеки SimscapeMultibody.

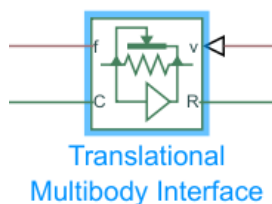


Рисунок 4.40 – Блок Translational Multibody Interface

Звено робота имеет позиционные ограничения, которые на реальном объекте управления фиксируются оптическими датчиками, в случае компьютерной модели ограничения можно определить в блоке Prismatic Joint. Параметры ограничений на перемещения представлены на рисунке 4.41. Они определяют верхнюю и нижнюю границу возможного перемещения, коэффициент упругости, демпфирования, которые определяют поведение звена при достижении ограничения.

Limits			
<input checked="" type="checkbox"/> Specify Lower Limit			
Bound	0	m	Compile-time
Spring Stiffness	1e2	N/m	Compile-time
Damping Coefficient	1e6	N/(m/s)	Compile-time
Transition Region Width	1e-4	m	Compile-time
<input checked="" type="checkbox"/> Specify Upper Limit			
Bound	300	mm	Compile-time
Spring Stiffness	1e2	N/m	Compile-time
Damping Coefficient	1e6	N/(m/s)	Compile-time
Transition Region Width	1e-4	m	Compile-time

Рисунок 4.41 – Ограничения на перемещение звена

Блок Rotational Multibody Interface, представленный на рисунке 4.42, является аналогом блока Translational Multibody Interface с той лишь разницей, что он преобразует вращательное движение в момент силы, поступающий на вращательное звено робота.

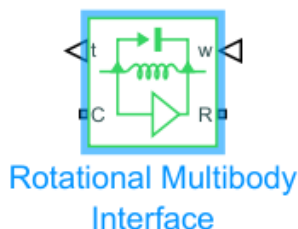


Рисунок 4.42 – Блок Translational Multibody Interface

Схема модели механизма поворота представлена на рисунке 4.43. В отличие от всех остальных звеньев, здесь не используется привод, а момент передается напрямую с двигателя на зубчатые колеса. Позиционные ограничения на поворот от 0 до 90 градусов заданы в блоке Revolute Joint.

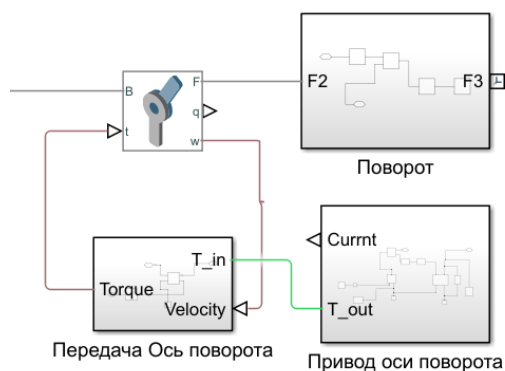


Рисунок 4.43 – Схема модели механизма поворота

Общая схема модели в MATLAB Simulink приведена на рисунке 4.44.

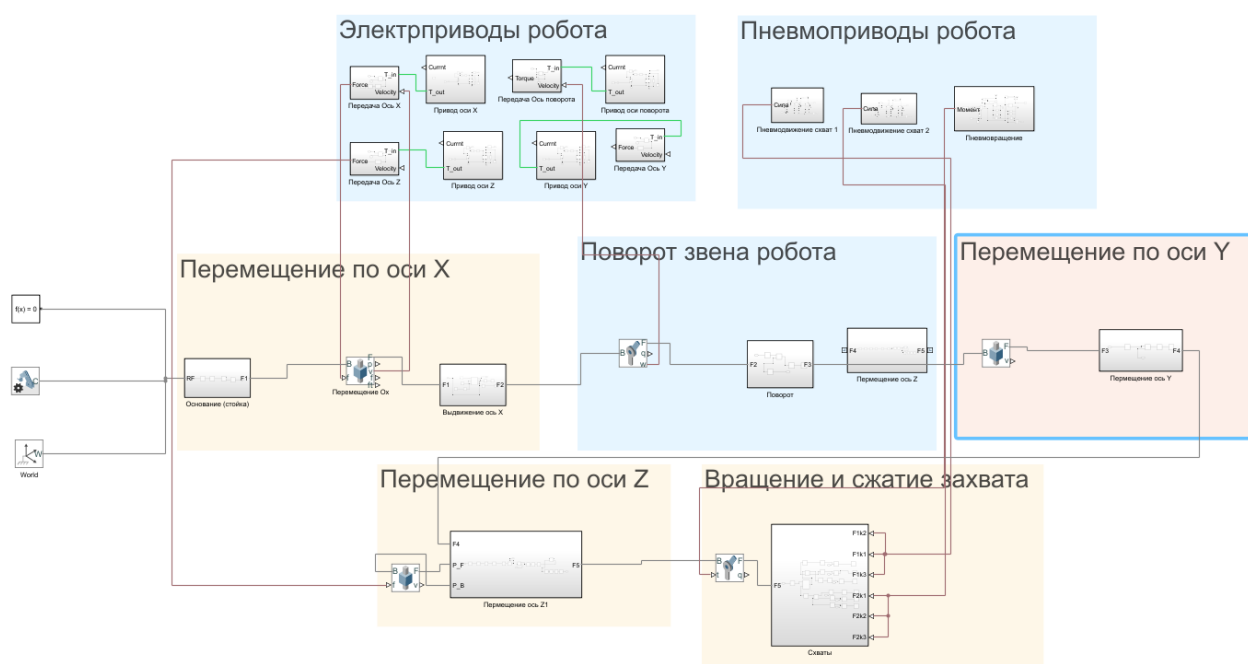


Рисунок 4.44 – Схема модели захватного устройства

В результате сборки схемы в Simulink модель имеет вид, представленный на рисунке 4.45.

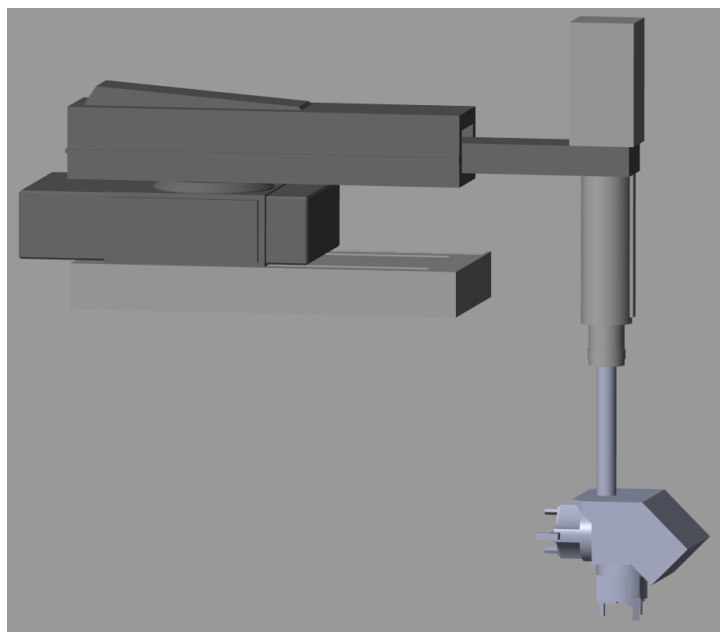


Рисунок 4.45 – Модель робота НЦТМ-01

4.4 Кинематический анализ робота на основе модели

Для собранной модели робота НЦТМ-01 можно провести кинематический анализ всех звеньев, то есть определить изменения положения звеньев, скорости поступательного движения звеньев и угловые скорости вращательных звеньев. Основным преимуществом кинематического анализа в Matlab Simulink является учет всех моментов инерций и масс звеньев с помощью библиотеки Simscape Multibody.

Блок Transform Sensor, приведенный на рисунке 4.46, измеряет временную зависимость между двумя системами координат и позволяет на основе этой зависимости определить основные кинематические характеристики: положение, скорость и ускорение. Датчик измеряет преобразование систем координат и их производные по времени относительно базового кадра. Базовой системой координат выбрана мировая система координат, и относительно нее будут определены кинематические характеристики движения звена.

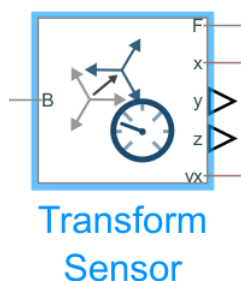


Рисунок 4.46– Внешний вид блока Transform Sensor

На рисунке 4.47 представлены график изменения положения механизма горизонтального перемещения по оси X и график скорости. Скорость звена равняется 61,5 мм/с.

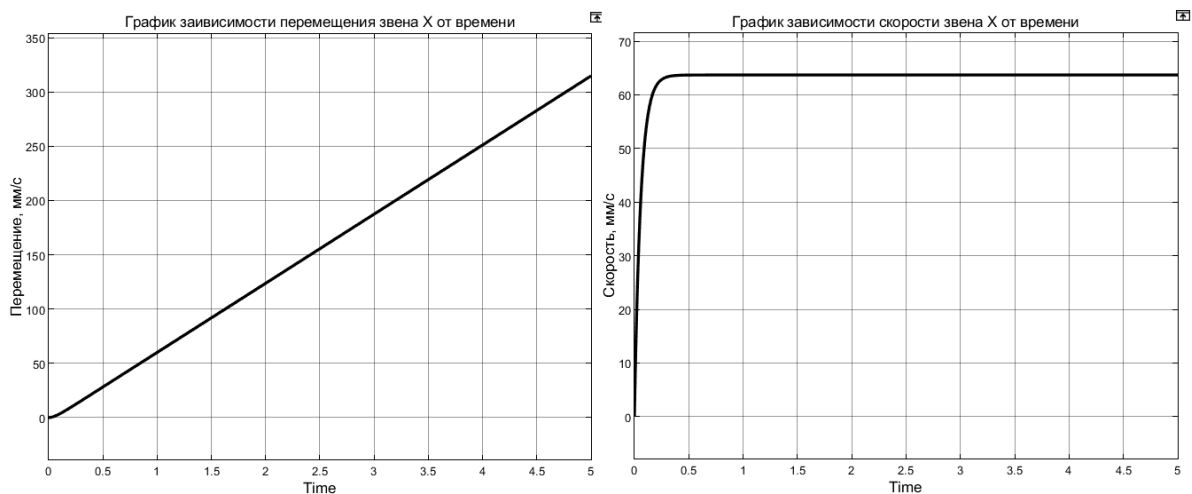


Рисунок 4.47 – Графики положения и скорости звена горизонтального перемещения по оси X

На рисунке 4.48 представлены график изменения угла поворота механизма поворота и график угловой скорости. Максимальная угловая скорость достигает 5,5 рад/с.

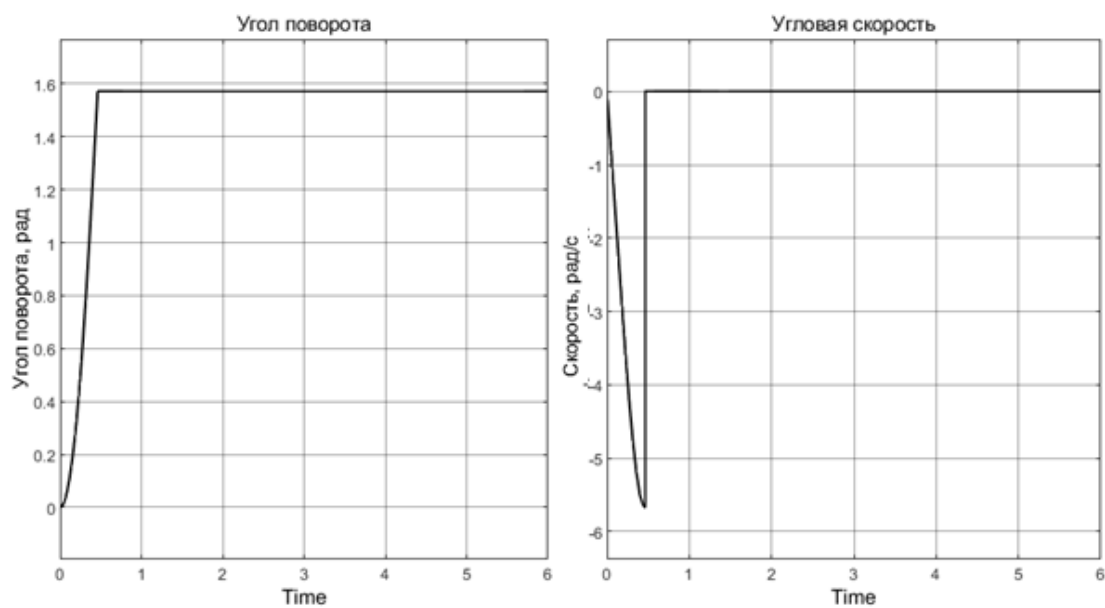


Рисунок 4.48 – Графики угла поворота и угловой скорости механизма поворота

На рисунке 4.49 представлены график изменения положения механизма горизонтального перемещения по оси Y и график скорости. Скорость звена равняется 121 мм/с.

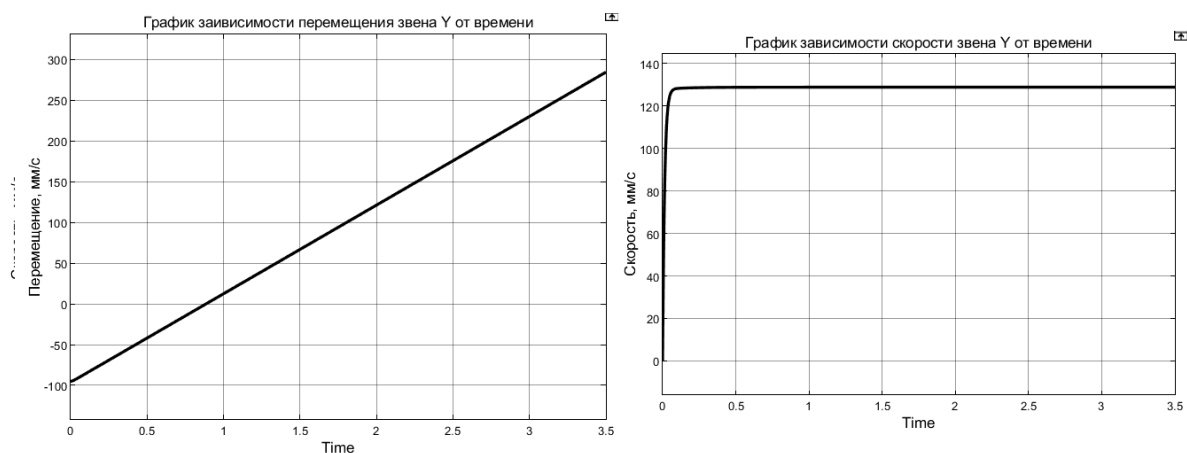


Рисунок 4.49 – Графики положения и скорости звена горизонтального перемещения по оси Y

На рисунке 4.50 представлены график изменения положения механизма горизонтального перемещения по оси Z и график скорости. Скорость звена равняется 46 мм/с.

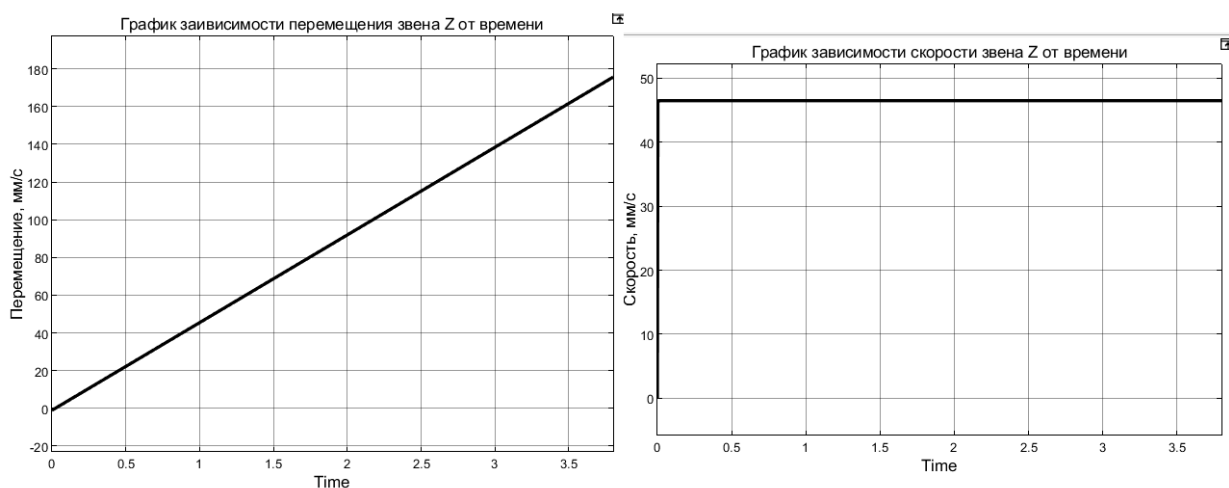


Рисунок 4.50 – Графики положения и скорости звена горизонтального перемещения по оси Z

На рисунке 4.51 представлены график изменения угла поворота механизма вращения схвата и график угловой скорости. Угловая скорость равна 5 рад/с.

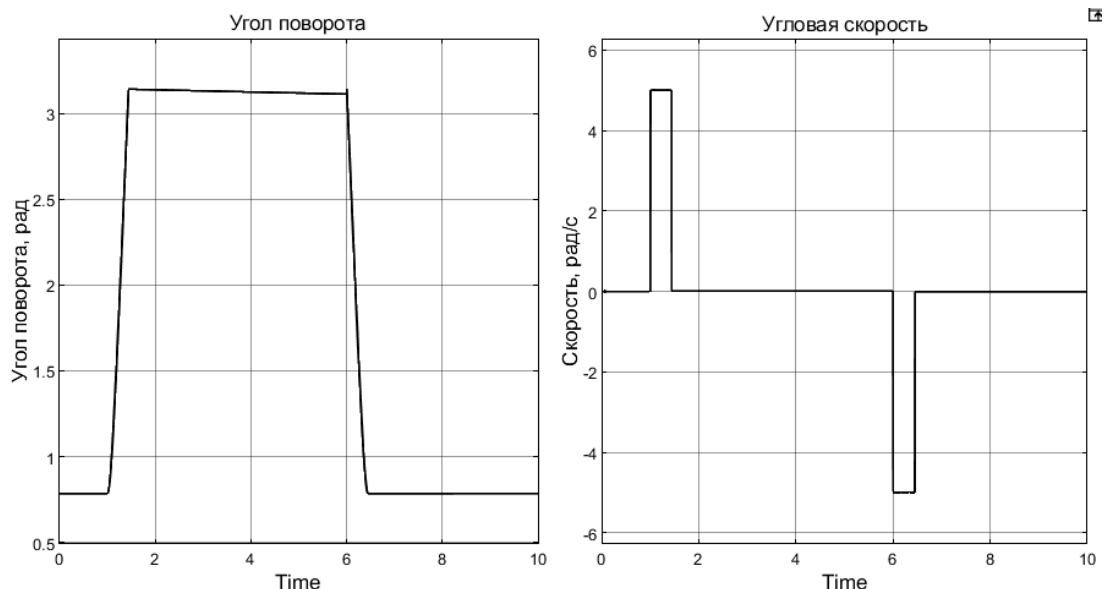


Рисунок 4.51 – Графики угла поворота и угловой скорости механизма поворота схвата

5 Разработка управляющей программы

5.1 Определение системы координат робота НЦТМ-01

Матричная и векторная алгебра применяются для систематического и обобщенного подхода к описанию и представлению расположения звеньев манипулятора относительно заданной системы координат. Так как звенья манипулятора могут совершать вращательное или поступательное движение относительно абсолютной (мировой) системы координат, для каждого звена определяется связанная система координат оси, оси которой параллельны осям сочленений звеньев [12]. На рисунке 5.1 приведен пример расположения систем координат в пространстве.

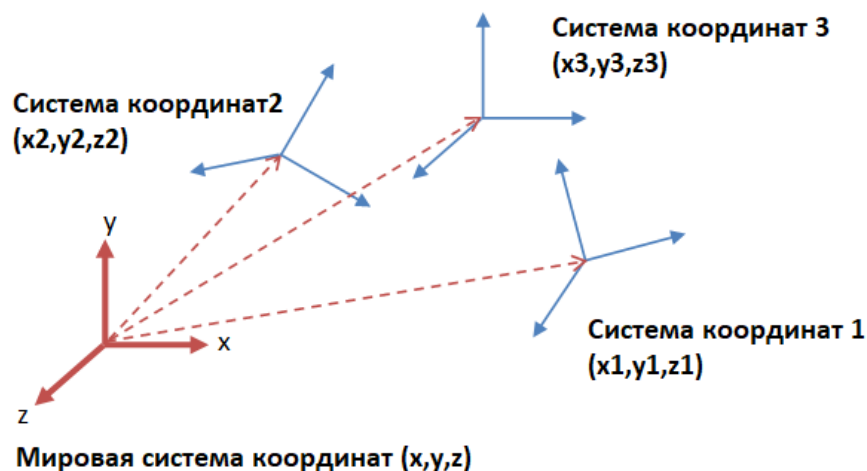


Рисунок 5.1 – Представление систем координат в пространстве

Основной задачей является выражение всех систем координат звеньев робота через неподвижную абсолютную систему координат. Представление координат в матричной форме, а именно в виде вектора столбца позволяет аналитически найти зависимости между всеми координатами.

В трехмерном пространстве системы координат могут быть как повернуты относительно друг друга, так и смещены на некоторое расстояние. В качестве матрицы, которая преобразует вектор, выраженный в однородных координатах, из одной системы отсчета в другую, служит однородная матрица преобразований размерностью 4×4 , имеющая вид:

$$H = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ t_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

где $R_{3 \times 3}$ – матрица вращения, $p_{3 \times 1}$ – вектор поступательного перемещения;
 $t_{1 \times 3}$ – матрица преобразования перспективы, которая равна $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

$$R_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} x_1 \cdot x_2 & x_1 \cdot y_2 & x_1 \cdot z_2 \\ y_1 \cdot x_2 & y_1 \cdot y_2 & y_1 \cdot z_2 \\ z_1 \cdot x_2 & z_1 \cdot y_2 & z_1 \cdot z_2 \end{pmatrix}; \quad (5.2)$$

Каждый элемент матрицы – это скалярное произведение между единичным вектором первой системы координат, относительно которой определяется вторая система координат, и единичным вектором второй системы координат.

$$p_{3 \times 1} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

где x, y, z – поступательное перемещение второй системы координат относительно первой по трем координатам.

Данного матричного представления достаточно для выражения всех систем координат звеньев через абсолютную систему координат.

На рисунке 5.2 представлено изображение всех координат, привязанных к звеньям. Основной системой координат является неподвижная система координат, расположенная на поверхности стола. Система координат механизма X связана с кареткой, которая может перемещаться. Система координат вращения связана с вращающим валом звена. Система координат механизма Y привязана к самому краю выдвигающегося механизма. Система координат Z – привязана к месту стыка цилиндра и места крепления захватного устройства. Последняя система координат связана с поверхностью цилиндрического захвата.

Для составления однородных матриц преобразования необходимо определить вращение и измерить перемещение координат относительно друг друга в цепной последовательности: от предыдущей системы координат к последующей. Для измерения расстояний между осями координат используется

блок в Simulink Transform Sensor, который определяет перемещение между любыми двумя системами координат. Поскольку модель робота, загруженная в Simulink, соответствует размерам реального робота, то с помощью модели можно определить все матрицы однородного преобразования.

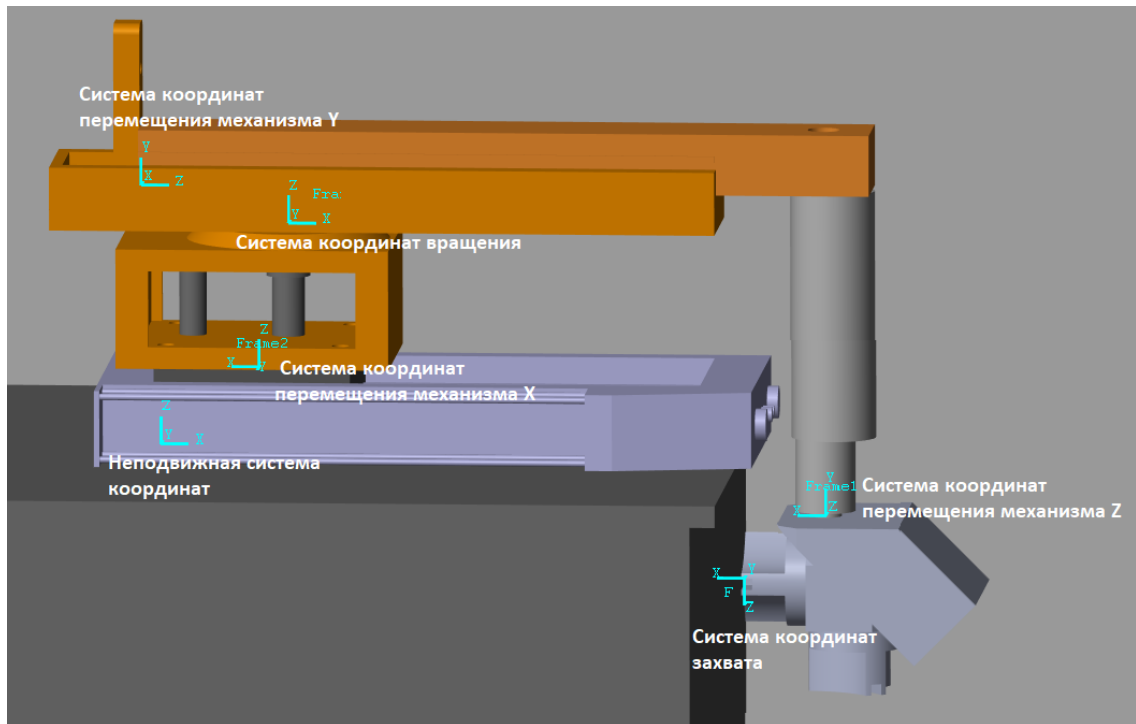


Рисунок 5.2 – Представление систем координат звеньев робота

Однородная матрица для оси перемещения механизма X:

$$H_1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 90 + x \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 71.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5.4)$$

где x – перемещение механизма X в мм;

Однородная матрица вращения:

$$H_2 = \begin{pmatrix} \cos(180 - \varphi) & -\sin(180 - \varphi) & 0 & -27 \\ \sin(180 - \varphi) & \cos(180 - \varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 133 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5.5)$$

где φ – угол вращения звена в градусах;

Однородная матрица для оси перемещения механизма Y:

$$H_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -135 + y \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

где y – перемещение механизма X в мм;

Однородная матрица для оси перемещения механизма Z :

$$H_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -299 - z \\ -1 & 0 & 0 & 626.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5.7)$$

где z – перемещение механизма X в мм;

Однородная матрица захвата:

$$H_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 74.826 \\ 0 & 0 & -1 & -60.1 \\ 0 & 1 & 0 & 5.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.8)$$

При умножении матриц получается итоговая матрица однородного преобразования, выражающая координаты захватного устройства в абсолютной системе координат стола:

$$H = H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \cdot H_4 \cdot H_5. \quad (5.9)$$

Данная матрица является решением прямой задачи кинематики, определяя по обобщенным координатам звеньев абсолютные координаты захватного устройства в пространстве.

5.2 Решение обратной задачи кинематики методом оптимизации

Основной трудностью в решении обратной задачи кинематики является наличие множества решений для достижения необходимых координат в отличие от прямой задачи кинематики, где решение определяется однозначно. Решение обратной задачи кинематики можно представить в виде решения задачи нелинейного программирования.

Общую постановку задачи нелинейного программирования можно определить как [1]:

$$Q(x) \rightarrow \text{extr}_{x \in X}, \quad (5.10)$$

где $Q(x)$ – целевая функция;

x – вектор параметров для оптимизации.

Необходимо определить экстремум целевой функции при условии линейных и позиционных ограничений:

$$A \cdot x \leq b, \quad (5.11)$$

$$0 \leq x \leq X; \quad (5.12)$$

где A и b – матрица линейных ограничений;

X – матрица позиционных ограничений.

Определим целевую функцию как расстояние между положением захвата и желаемого положения. Тогда аргументом функции будет вектор координат захвата:

$$Q = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}, \quad (5.13)$$

где x, y, z – координаты захвата;

x_3, y_3, z_3 – координаты заданного положения.

В качестве ограничений целевой функции будут позиционные ограничения на перемещение каждого поступательного звена и ограничение на поворот:

$$0 \leq x \leq 297, \quad (5.14)$$

$$0 \leq y \leq 317, \quad (5.15)$$

$$0 \leq z \leq 170, \quad (5.16)$$

$$0 \leq \varphi \leq 90. \quad (5.17)$$

Для решения поставленной задачи нелинейного программирования будет использован метод Нелдера – Мида, являющийся оптимизационным алгоритмом на основе построения симплекса. Данный алгоритм считается методом безусловной оптимизации, который не использует градиент функции, а определяет экстремум непосредственно через значения функции.

Данный метод реализован в MATLAB в виде функции `fmincon()`, где входными параметрами являются позиционные ограничения, начальные значения и сама целевая функция, а в результате оптимизации получаются необходимые координаты захвата на основе обобщенных координат. Для выражения координат захвата через обобщенные координаты достаточно воспользоваться матрицей (5.9), в котором первые три строки четвертого столбца являются координатами захвата.

В таблице 5.1 приведено сравнение полученных координат при решении прямой задачи кинематики и полученных обобщенных координат при решении обратной задачи для различных входных параметров:

Таблица 5.1 – Сравнение результатов ОЗК и ПЗК

Прямая задача кинематики		Обратная задача кинематики	
Вектор обобщенных координат [d1 d2 d3 φ], мм	Вектор координат захвата [x y z], мм	Вектор координат захвата [x y z], мм	Вектор обобщенных координат [d1 d2 d3 φ], мм
[150 250 100 0]	[933,4 5,5 -220,6]	[933,4 5,5 -220,6]	[200 200 100 0]
[0 135 115 90]	[122,5 -551,4 -235,6]	[122,5 -551,4 -235,6]	[0 134,9 115 90]
[250 70 0 90]	[372,5 -486,4 -120,6]	[372,5 -486,4 -120,6]	[54,7 109,8 0 68,2]
[250 70 0 90]	[372,5 -486,4 -120,6]	[372,5 -486,4 -120,6]	[249,9 70 0 90]

В первой строке таблицы 5.1 вектор обобщенных координат не совпал с вектором обобщенных координат, полученных путем решения ОЗК, однако координаты схвата полностью совпали. Такая ситуация возможна, из-за того, что ОЗК имеет множество решений, а в оптимизации не указано условие, которое определяло бы более предпочтительное движение. Для этого может быть реализована функции стоимости, но для планирования траектории данного робота это излишне.

Во второй строке таблицы 5.1 как обобщенные, так и пространственные координаты полностью совпали за исключением одной оси, где разность составила 0,1 мм.

В третьей строке видно, что хоть координаты захвата полностью совпадают, обобщенные координаты сильно отличаются, главным образом – углом поворота. Поворот робота определен только в двух углах, 0° и 90° , поэтому определить угол поворота в 68° невозможно.

Для устранения этого недостатка программным путем будет определяться, должен ли робот повернуться на 90 градусов. Поскольку робот совершает перемещение в двух перпендикулярных плоскостях, то в одной из этих плоскостей всегда будет постоянна одна из координат: либо x, либо y. Если координата y остается постоянной, значит робот не должен совершить поворот, в противном случае – поворот на 90 градусов.

В четвертой строке приведены результаты при добавлении этого программного решения. Как видно, теперь координаты полностью достижимы роботом.

Траектория при данном подходе строится от точки к точке (point to point), а достижения ее возможно разными способами. Простейшим способом достижения необходимого положения в пространстве является одновременное подача напряжения на приводы до момента, пока каждое звено не переместится на заданное расстояние.

Помимо позиционных ограничений на перемещение, которые определяются концевыми датчиками робота, существует и пространственное ограничение, связанное с расположением робота. Поскольку робот неподвижно закреплен к столу, то во всех рабочем пространстве робота есть ограничение в виде угла стола, которое изображено на рисунке 5.3.

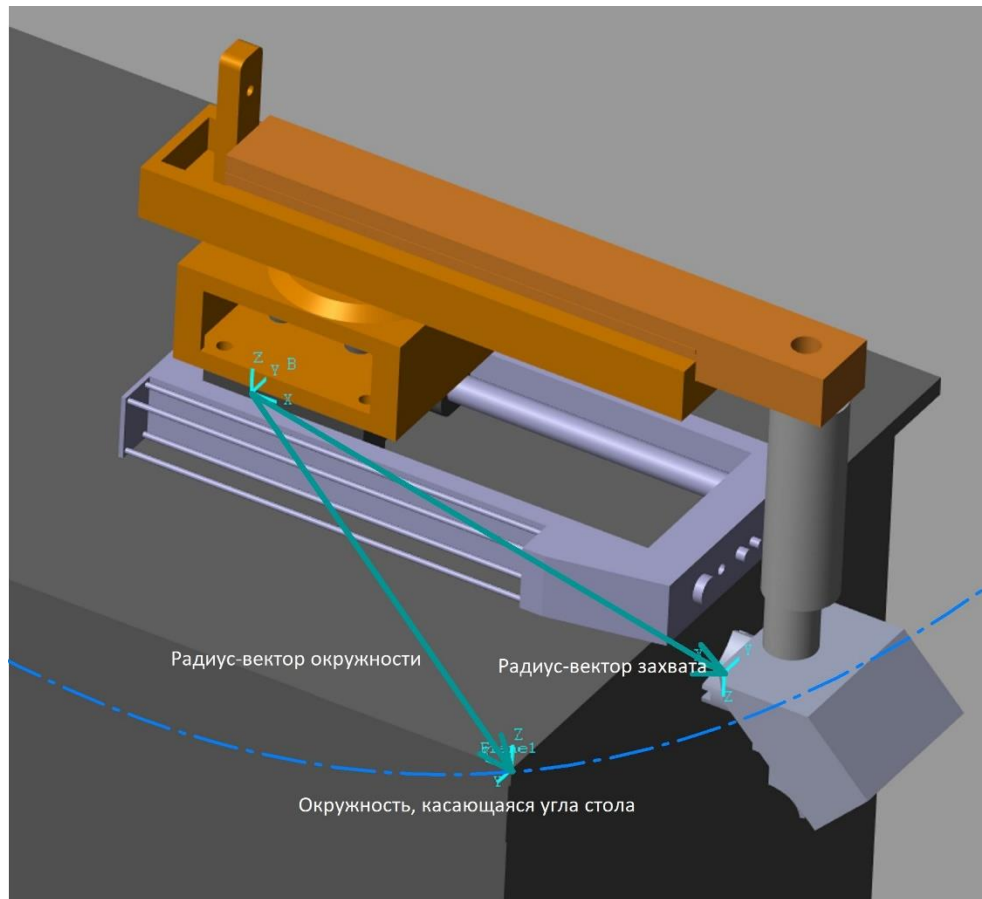


Рисунок 5.3 – Пространственное ограничение робота

Робот может задеть угол только при повороте вдоль окружности, радиус-вектор которой меньше радиуса-вектора окружности, касающейся угла стола. Для того, чтобы избежать столкновения со столом, в момент поворота радиус-вектор, определяющий положение захвата, должен быть по модулю больше, чем радиус пограничной окружности. Поскольку окружность расположена в плоскости стола, координата Z никак не влияет на столкновение. Радиус пограничной окружности определим на основе модели, собранной в MATLAB Simulink:

$$R_{\text{окр}} = \sqrt{x_{\text{окр}}^2 + y_{\text{окр}}^2} = \sqrt{535^2 + 402,5^2} = 683.57 \text{ мм.} \quad (5.18)$$

где $x_{\text{окр}}$, $y_{\text{окр}}$ – координаты пограничной окружности.

Таким образом, если радиус-вектор захвата будет больше, чем радиус вектор окружности, то столкновения не произойдет, что можно записать в виде:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} > 683.57 \text{ мм.} \quad (5.19)$$

Это уравнение можно было бы использовать в качестве еще одного ограничения в оптимизации, но механизм поворота робота не оснащен энкодером, поэтому в момент поворота координаты не могут быть определены

из-за отсутствия информации об угле поворота. Добавление энкодера в механизм вращения все равно не позволит решить задачу позиционирования поскольку сама конструкция механизма в промежуточном положении, пока не достигнуты концевые значения, не позволяет фиксировать звено, из-за чего не устраняется воздействие инерции других звеньев на поворот.

Поэтому после решения обратной задачи с помощью оптимизации проверяется условие на столкновения со столом. Если условие не выполняется, то перед движением по траектории необходимо выдвинуть захват на необходимое расстояние, чтобы он был за пределами ограничивающей окружности. После совершения поворота, захват возвращается в исходное положение и уже реализуется управления на основе решения обратной задачи кинематики. Код программы решения обратной задачи кинематики представлен в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

5.3 Организация связи между устройствами системы управления

5.3.1 Связь между Arduino и Matlab

Для управления роботом необходим расчет траектории, основанный на перемножении однородных матриц преобразования, однако программная среда для программирования ПЛК STEP 7 MicroWin не позволяет проводить подобные матричные операции, в связи с чем возникает необходимость проведения расчетов и оптимизации параметров в другой среде, и с помощью организации связи непосредственно передавать данные на ПЛК.

В качестве программной среды для расчетов выбран MATLAB ввиду быстродействия и удобства вычисления матричных выражений, наличия готовых функций для оптимизации и, самое важное, прямого взаимодействия с компьютерной моделью в Simulink, что позволит запустить модель после реализации управления реальным объектом.

В качестве интерфейса передачи данных используется последовательный интерфейс. Последовательный интерфейс — это коммуникационный интерфейс, который передает данные в виде единого потока битов. Действует как коммуникационный интерфейс между двумя цифровыми системами, который передает данные в виде серии импульсов напряжения по проводам. Устройства, использующие последовательный интерфейс, включают универсальную последовательную шину (USB) или рекомендуемый стандарт RS-232. В перечне графического материала приведена структурная схема системы управления, где описана организация связи между всеми устройствами.

Единственные данные, передаваемые в MATLAB с Arduino — это значения счетных импульсных датчиков для трех последовательно перемещающихся звеньев X, Y и Z. Эта данные служат обобщенными координатами для решения прямой и обратной задачи кинематики. Данные, передаваемые с MATLAB на Arduino — это управляющие команды, необходимые для активации движения того или иного звена. С этой целью счетные датчики будут подключены к пинам

Arduino Mega, где есть достаточное количество прерываний для обработки импульсов. Остальные датчики будут подключены к ПЛК для ограничения движения в крайних положениях. Arduino имеет обмен данными с Matlab, который необходим для реализации интерфейса управления и цифровой модели.

Код программы для организации, передачи и приема данных между Arduino и Matlab приведен в ПРИЛОЖЕНИИ В.

5.3.2 Связь между Arduino и ПЛК Siemens S7-200

У контроллера S7-200 в наличии два коммуникационных порта с уровнями сигнала RS-485, представленные в виде D-образного разъема. Назначение контактов портов приведено на рисунке 5.5. ПЛК S7-200 поддерживает режим свободно программируемого обмена данными с устройствами. Использование кабеля RS-232/PPI Multi-Master позволяет связать устройства между собой с контроллером через шину RS232 [5].

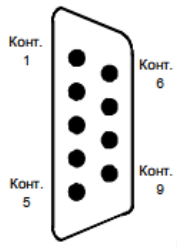
Разъем	Номер контакта	Сигнал PROFIBUS	Порт 0/Порт 1
	1	Экран	Заземляющий контакт
	2	Обратный провод 24 В	Общий провод логики
	3	RS-485, сигнал В	RS-485, сигнал В
	4	Запрос на передачу	RTS (TTL)
	5	Обратный провод 5 В	Общий провод логики
	6	+5 В	+5 В, последовательно включенный резистор 100 Ом
	7	+24 В	+24 В
	8	RS-485, сигнал А	RS-485, сигнал А
	9	Не используется	10-битовый протокол (вход)
	Корпус разъема	Экран	Заземляющий контакт

Рисунок 5.5 - Назначение контактов коммуникационного порта S7–200

На рисунке 5.6 представлена инициализация контроллера на прием данных по порту 0 со скоростью 9600 Кбайт, где началом сообщения является число 1, а окончанием сообщения – число 10. По завершению приема срабатывает прерывание, уведомляющее об окончании приема. Данная программа может быть полезна в дальнейшем при реализации связи внутри роботизированной технологической системы (РТС).

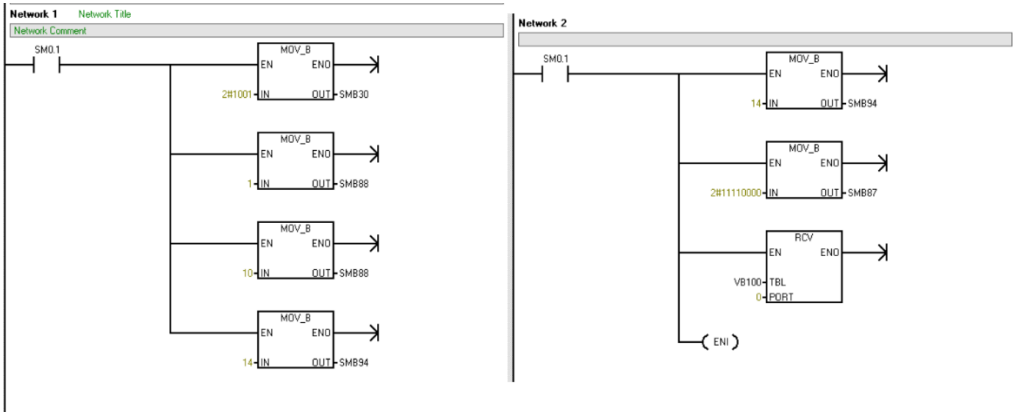


Рисунок 5.6 – Программная настройка порта для приема данных ПЛК

Однако было принято решение не использовать интерфейс передачи данных между ПЛК и Arduino, а дополнить уже имеющуюся схему преобразователя из 5В в 24В и организовать связь с помощью гальванической развязки.

5.4 Разработка управляющей программы для ПЛК

Ручное управление роботом осуществляется с помощью тумблеров, каждый из которых отвечает за отдельное движение звена робота. Достоинством такого управления является простота и возможность самостоятельно оператором произвести технологическую операцию, проследить за работой каждого звена в отдельности. К недостаткам же относится невозможность управления всеми звеньями одновременно, отсутствие точности в управлении, отсутствие цикличности в управлении. Данный тип управления подойдет для первого ознакомления с объектом управления и принципом работы системы управления.

В таблице 5.2 приведены обозначения основных дискретных входов и выходов ПЛК

Таблица 5.2 – Обозначение дискретных входов и выходов ПЛК

Адрес	Обозначение выхода
Q0.0	Активация подачи напряжения на приводы
Q0.1	Движение вперед механизма X
Q0.2	Движение назад механизма X
Q0.3	Движение вперед механизма Y
Q0.4	Движение назад механизма Y
Q0.5	Движение вперед механизма Z
Q0.6	Движение назад механизма Z
Q0.7	Поворот звена по часовой стрелке
Q1.0	Поворот звена против часовой стрелки
Q1.1	Ротация схвата по часовой стрелке
Q2.0	Ротация схвата против часовой стрелки
Q2.1	Сжатие захвата 1
Q2.2	Разжатие захвата 1
Q2.3	Сжатие захвата 2
Q2.4	Разжатие захвата 2
I0.0	Датчик начального положения механизма X
I0.1	Датчик конечного положения механизма X
I0.3	Датчик начального положения механизма Y
I0.5	Датчик конечного положения механизма Y
I0.7	Датчик начального положения механизма Z
I1.0	Датчик начального положения поворота
I1.1	Датчик начального положения поворота

На рисунке 5.7 представлена основная часть программы, активирующая реле при переключении тумблеров. Движение ограничивается концевыми датчиками, срабатывание которых обрывает команду на перемещение, чтобы не

происходило столкновений звеньев. Полный код программы управления с ПЛК приведен в ПРИЛОЖЕНИИ Г.

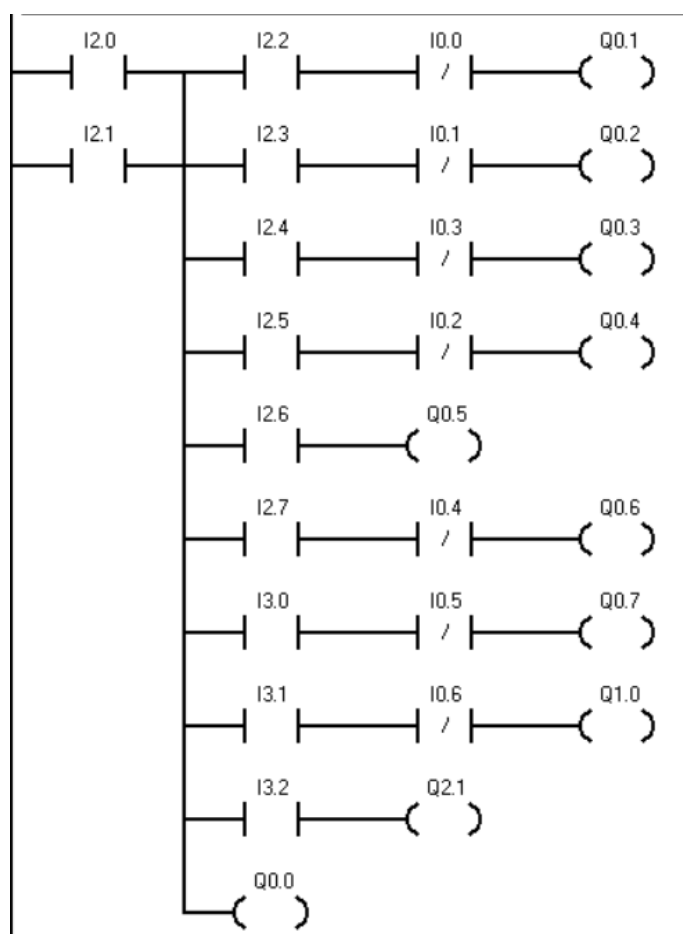


Рисунок 5.7 – Программа активации реле

5.5 Разработка интерфейса управления в MATLAB GUIDE

После того, как реализована программная часть на ПЛК и микроконтроллере Arduino, необходимо разработать интерфейс, с помощью которого оператор мог бы взаимодействовать с роботом. В качестве среды разработки выбран MATLAB GUIDE, который используется для создания графического интерфейса. На рисунке 5.8 приведен вид интерфейса взаимодействия.

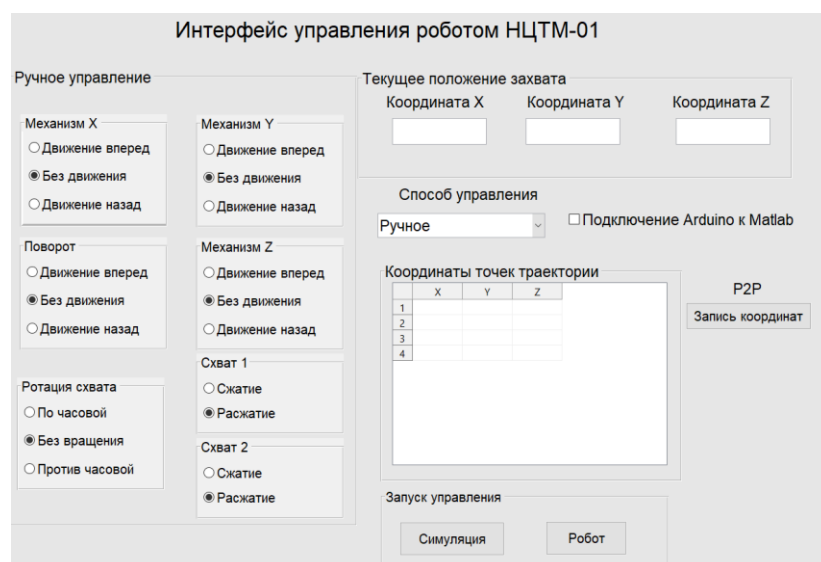


Рисунок 5.8 – Интерфейс взаимодействия

Управление начинается с того, что выбирается способ управления: ручное управление, цикловое или позиционное. При выборе ручного управления активируется левое поле интерфейса, где возможно управления каждым механизмом робота путем переключения кнопок на дисплее.

При выборе циклового режима управления активируется программа, уже заранее реализованная с просчитанной траекторией. Данный вид управления подойдет для выполнения повторяющихся операций, например захвата заготовки с носителя и перенос ее на место обработки.

Позиционное управления является также управлением в автоматическом режиме с той лишь разницей, что координаты желаемой траектории не были рассчитаны заранее, а могут быть получены путем ручного управления и самостоятельного выбора положения робота в пространстве.

В поле текущее положение захвата выводятся координаты захвата по достижению заданной точки. Графическое окно в правой части интерфейса выводит график траектории после завершения управления.

6 Проведение пусконаладочных работ

Все испытания следует проводить с соблюдением требований безопасности и в нормальных климатических условиях, установленных ГОСТ 15150-69. Перед проведением испытаний механизм горизонтального перемещения по оси X должен находиться в левом крайнем положении, механизм горизонтального перемещения по оси Y должен быть втянут в крайнее положение, механизм горизонтального перемещения по оси Z должен находиться в крайнем верхнем положении, угол поворота должен составлять 0 градусов, определенные концевыми датчиками.

Производится включения блока питания, и поочередно переключаются тумблеры управления для определения подачи напряжения на входы контроллера. При переключении каждого тумблера загорается светодиод на

ПЛК с адресом от I2.0 до I2.7. Затем поочередно на каждый привод звеньев подается напряжение через релейный блок и определяется достижимость роботом конечного положения и срабатываниях всех концевых датчиков.

Измеряется с помощью измерительного инструмента фактическое перемещение всех звеньев с поступательным движением и определяется шаг перемещения по формуле:

$$\Delta L = \frac{L}{n}, \quad (6.1)$$

где L – величина перемещения, мм;

n – общее число импульсов от счетного датчика за весь пройденный путь.

Шаг перемещения для каждого звена:

$$\Delta L_x = \frac{297}{625} = 0,396;$$

$$\Delta L_y = \frac{317}{800} = 0,406;$$

$$\Delta L_z = \frac{170}{440} = 0,386;$$

Производится сравнение вычисленной величины шага перемещения с заданной по формуле:

$$\Delta = |\Delta L - \Delta l_0|, \quad (6.2)$$

где Δ - погрешность;

Δl_0 - заданная величина шага перемещения равная 0,4 мм/импульс.

Погрешность шага перемещения для каждого звена:

$$\Delta_x = |0,396 - 0,4| = 0,004 \text{ мм/импульс};$$

$$\Delta_y = |0,406 - 0,4| = 0,004 \text{ мм/импульс};$$

$$\Delta_z = |0,386 - 0,4| = 0,016 \text{ мм/импульс}.$$

Максимальная погрешность составляет 0,022 мм/импульс, что можно объяснить искривленностью диска энкодера у привода механизма поступательного движения по оси Z, меньшим количеством щелей в диске и различием небольшим различием при подъеме и опускании.

На основе измеренного количества импульсов и заданной величины шага определяется расстояние по формуле:

$$L = \Delta l_0 \cdot n. \quad (6.3)$$

Вычисление перемещения для каждого звена:

$$L_x = 0,4 \cdot 750 = 300 \text{ мм};$$

$$L_y = 0,4 \cdot 780 = 312 \text{ мм};$$

$$L_z = 0,4 \cdot 450 = 180 \text{ мм}.$$

Производится сравнение фактического перемещения с полученным путем подсчета импульсов:

$$\Delta l = |L - \Delta L| \quad (6.4)$$

Определение погрешности позиционирования для каждой оси:

$$\Delta l_x = |L_x - \Delta L_x| = |300 - 297| = 3 \text{ мм};$$

$$\Delta l_y = |L_y - \Delta L_y| = |312 - 317| = 5 \text{ мм};$$

$$\Delta l_z = |L_z - \Delta L_z| = |180 - 170| = 10 \text{ мм};$$

Средняя скорость звена определяется по формуле:

$$V = \frac{L}{t}, \quad (6.5)$$

где t – время движения оси от начального положения до конечного.

Средняя скорость каждого звена поступательного движения:

$$V_x = \frac{297}{4,65} = 63,88 \text{ мм/с}$$

$$V_y = \frac{317}{3,17} = 100 \text{ мм/с}$$

$$V_z = \frac{170}{3,86} = 44,04 \text{ мм/с}$$

Подключив Arduino, можно измерить импульсы за каждую 0,01 секунды с использованием аппаратных прерываний. На рисунке 6.1, 6.2 и 6.3 представлены графики зависимости скоростей звеньев X, Y, Z от времени. На рисунке 6.4, 6.5, 6.6 представлены графики положения звеньев X, Y, Z в зависимости от времени. Для исключения резких скачков на графике, связанных с неточностью измерения скорости на основе числа импульсов, приведены также сглаженные графики

фильтром скользящего среднего. Полученные графики соответствуют средним значениям скоростей и перемещения, которые были получены ранее.

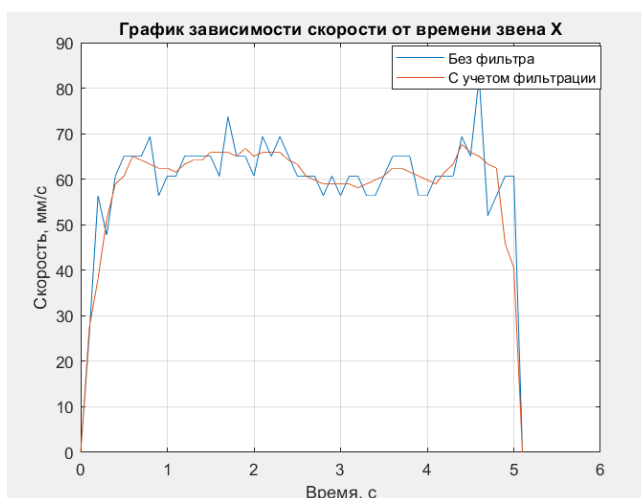


Рисунок 6.1 – График зависимости скорости звена X от времени

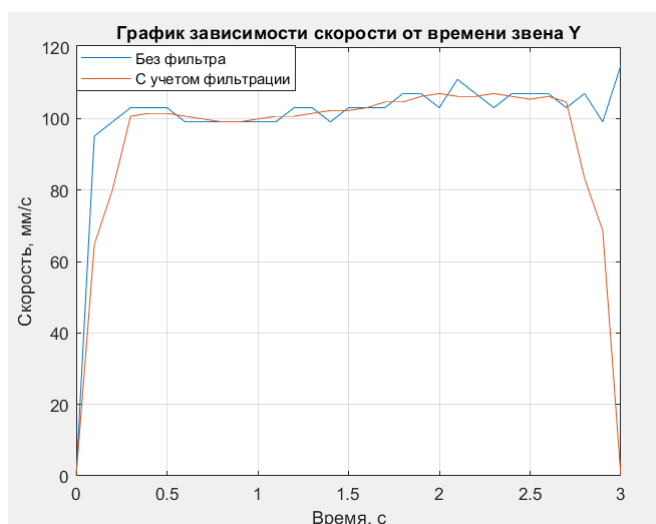


Рисунок 6.2 – График зависимости скорости звена Y от времени

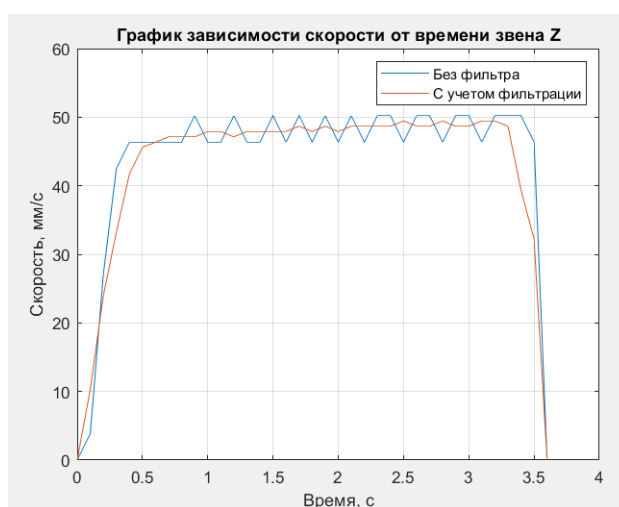


Рисунок 6.3 – График зависимости скорости звена Z от времени

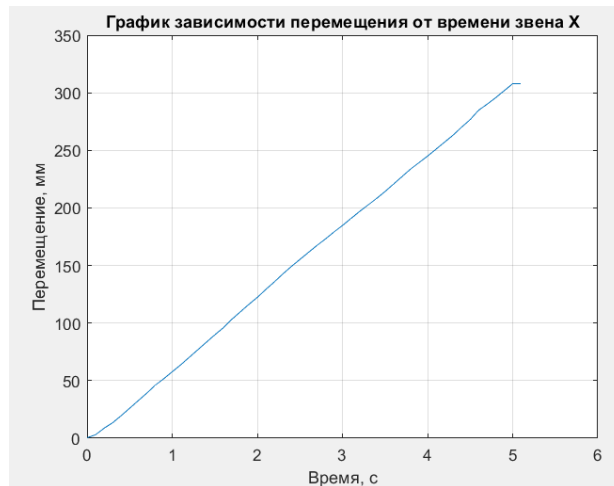


Рисунок 6.4 – График зависимости скорости звена X от времени

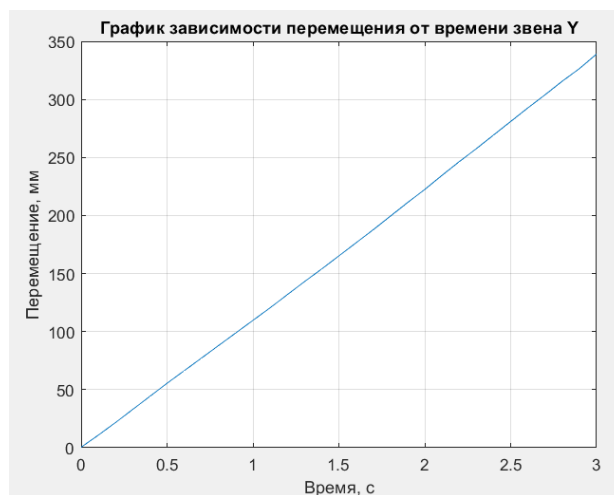


Рисунок 6.5 – График зависимости скорости звена Y от времени

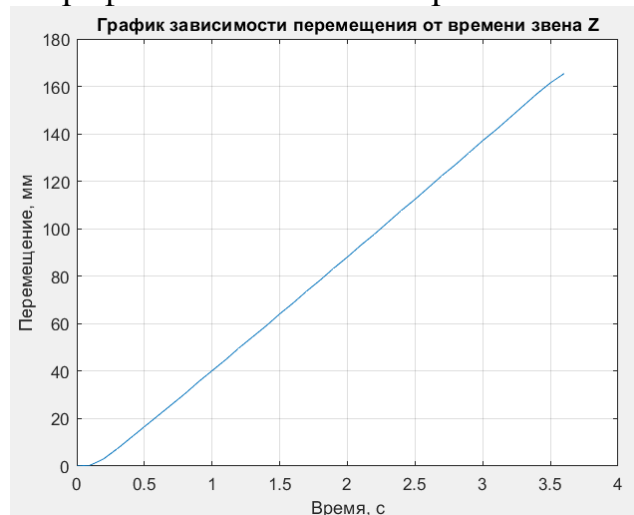


Рисунок 6.6 – График зависимости скорости звена Z от времени

После исследования работы электромеханических частей робота, проводится проверка пневмооборудования. Подается из магистрали сжатый воздух с избыточным давлением $(3,5 - 6) \cdot 10^5$ Па. Поочередно тумблерами переключается подача напряжения на пневмораспределители, в следствие чего

должно происходить сжатие двух захватов и поворот захватного устройства на угол не более чем на 180 градусов.

В результате проведения оценочного исследования движения звеньев робота можно сделать вывод, что с большим числом операций будет накапливаться погрешность перемещения, поэтому обязательно перед запуском управления необходимо произвести калибровку из начального положения, в результате которой будет определено количество импульсов за полное перемещение звена. Для планирования траектории будет использоваться не более 10 положений, чтобы накопленная погрешность не оказывала влияния на текущее положение робота в системе координат. После завершения заданной траектории систему управления должна вернуть робота в начальное положение и сбросить все координаты, накопленные в процессе выполнения программы.

7 Безопасность и экономичность проекта

7.1 Безопасность и экологичность проекта

7.1.1 Безопасность оборудования

Оборудование должно соответствовать требованиям безопасности при проведении монтажных работ, эксплуатации, ремонте, транспортировании и хранении. Большинство мер безопасности внедряется на этапе проектирования, где учитываются более пятидесяти различных стандартов Системы стандартов безопасности труда (ССБТ) и других нормативных документов.

Это позволяет обеспечить безопасность при использовании оборудования на всех этапах его жизненного цикла, начиная от разработки до утилизации.

Безопасность оборудования в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.001, ГОСТ12.2.003 и ГОСТ12.0.003 обеспечивается:

- применением в конструкции средств механизации, автоматизации и дистанционного управления;
- выполнением эргономических и эстетических требований;
- выбором безопасных органов управления;
- применением в конструкции средств защиты;
- соблюдением требований безопасности при эксплуатации, монтажных работах, транспортировании и хранении;
- размещением оборудования на площадке;
- профессиональным отбором и обучением работающих;
- выбором электрооборудования и конструкции оборудования с учетом пожарной безопасности;
- контролем за соблюдением требований безопасности, правил эксплуатации и трудового законодательства по охране труда работающими.

В данном проекте разработаны меры по обеспечению безопасной эксплуатации оборудования в течение всего срока службы, а именно:

- соблюдены требования безопасности при эксплуатации, монтажных работах, транспортировании и хранении, согласно документациям ПР;
- оборудование в лаборатории размещено, согласно ПУЭ и ГОСТ 60.0.2.1;
- соблюдены эргономичные требования по установке оборудования.
- используются красные ленты для ограничения рабочей зоны работа;
- пульт ручного управления расположен вне рабочей зоны;
- имеется тумблер, обрывающий питание приводов работа.

7.1.2. Пожарная безопасность

Пожарная безопасность оборудования обеспечена в соответствии с требованиями настоящих стандартов, ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.1.018, ГОСТ 12.2.007.0, ПУЭ, ПТЭ, и ПТБ, СНиП 3.05.06, СНиП 3.05.07. Выбран тип исполнения, вид взрывозащиты электрооборудования и степень его защиты от пыли и влаги.

Для обеспечения пожарной безопасности необходимо провести следующие мероприятия пожарной профилактики:

- организационные (инструктаж персонала, разработка плана эвакуации и т.д.);
- технические (устройства не горючих перегородок);
- режимные;
- эксплуатационные (профилактические осмотры).

7.1.3 Экологическая безопасность материалов

Один из экологических показателей связан с безопасностью исходных материалов и веществ, используемых в конструкции оборудования. При разработке и эксплуатации объекта были соблюдены все нормативные требования в области охраны природы. В конструкциях применены сертифицированные материалы и вещества, соответствующие стандартам ССБТ и требованиям по охране окружающей среды. Проект включает комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности труда в соответствии с ГОСТ и СНиП. Это позволяет считать данный проект относительно безопасным и экологически безопасным.

7.2 Экономический анализ проекта

7.2.1 Расчет стоимости программного обеспечения

Цель технико-экономического расчета - определение затрат на разработку и модернизацию системы управления. Смета затрат представляет собой денежное выражение расходов предприятия на разработку и выполнение хозяйственно-договорных работ. Смета включает в себя следующие статьи затрат:

- затраты на оборудование и ПО (программное обеспечение);
- амортизация используемого оборудования;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления на социальное страхование;
- электроэнергия.

Стоимость затрат на приобретение компонентов и ПО вычисляется по формуле:

$$S = S_{об} + S_{прог}, \quad (7.1)$$

где $S_{об}$ – стоимость затрат на приобретение компонентов;
 $S_{прог}$ – стоимость затрат на приобретение ПО.

В таблице 7.1 приведена смета по затратам на покупку оборудования и ПО.

Таблица 7.1 – Затраты на оборудование и ПО

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб	Сумма, руб
Оборудование системы управления:				
S7-200 CPU 224 (6ES7 214-1AD23-0XB0)	шт	1	20000	20000
SIMATIC EM 277 (6ES7 277-0AA22-0XA0)	шт	1	15000	15000
Arduino Mega 2560	шт	1	1250	1250
Источник питания SITOP PSU300S	шт	1	90000	20000
Персональный компьютер	шт	1	60000	60000
Общая цена оборудования				116250
Транспортные расходы (2%)				2325
Электромонтаж оборудования:				
Реле SIEMENS LZX: RT3B4R24	шт	16	140	2240
Преобразователь LM2596	шт	1	150	150
Оптрон PC817	шт	20	40	800
PROFIBUS FC Standard Cable (6XV1 830 0EH10)	шт	1	1000	1000
Клеммник для платы	шт	40	20	840
Набор резисторов	шт	1	50	50
Общая цена электромонтажных работ				5080
Программное обеспечение:				
SIMATIC S7, STEP7 MICRO/WIN	шт	1	20000	50000
MATLAB	шт	1	15000	100000
EPLAN Electric	шт	1	90000	50000
Общая цена программного обеспечения	шт	16	140	200000

Тогда общая стоимость затрат на оборудование и ПО будет:

$$S = 116250 + 200000 = 316\,250 \text{ руб.}$$

7.2.2 Расчет затрат на электроэнергию

Данные для расчета затрат на электроэнергию:

- мощность, потребляемая персональным компьютером – 500 Вт;
 - мощность, потребляемая лампой дневного света – 40 Вт;
 - количество ламп в помещении – 10 шт;
 - мощность, потребляемая блоком питания: 100 Вт;
 - тариф на электроэнергию в Красноярске - 3,53 руб./кВт · ч.
- Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$S_{эл} = (P_{ПК} + P_{л} \cdot N_{л} + P_{БП}) \cdot N_{ч} \cdot N_{д} \cdot T_{эл} \quad (7.2)$$

где $P_{ПК}$ – мощность, потребляемая персональным компьютером;

$P_{л}$ – мощность, потребляемая лампой;

$N_{л}$ – количество ламп;

$N_{ч}$ количество часов в рабочем дне;

$N_{д}$ – количество рабочих дней;

$T_{эл}$ – тарифная стоимость электроэнергии.

Вычислим затраты на электроэнергию:

$$S_{эл} = (0,5 + 0,04 \cdot 10 + 0,1) \cdot 8 \cdot 84 \cdot 3,53 = 2372,2 \text{ руб.}$$

7.2.3 Расчет затрат на амортизацию оборудования

Данные для расчета:

- стоимость оборудования до амортизации – 189190 руб.;
- время пользования оборудованием – 4 месяца;
- срок службы оборудования 2 – лет.

Затраты на амортизацию определяются по формуле:

$$S_{ам} = \frac{(S_{об} \cdot N_{мес})}{(N_{лет} \cdot 12)}, \quad (7.3)$$

где $N_{мес}$ – время использования в месяцах;

$N_{лет}$ – срок службы в годах.

$$S_{ам} = \frac{(116250 \cdot 4)}{(5 \cdot 12)} = 3875 \text{ руб.}$$

7.2.4 Смета затрат

В таблице 7.2 представлена смета затрат на систему управления, а на рисунке 7.1 приведена круговая диаграмма, отображающая процентное соотношение расходов.

Таблица 7.2 – Смета затрат

Наименование затрат	Сумма затрат, руб.
Оборудование	116250
Программное обеспечение	200000
Электромонтажные работы	5080
Электроэнергия	2372.2
Транспортные расходы	2325
Амортизация оборудования	3875
Итого:	325205

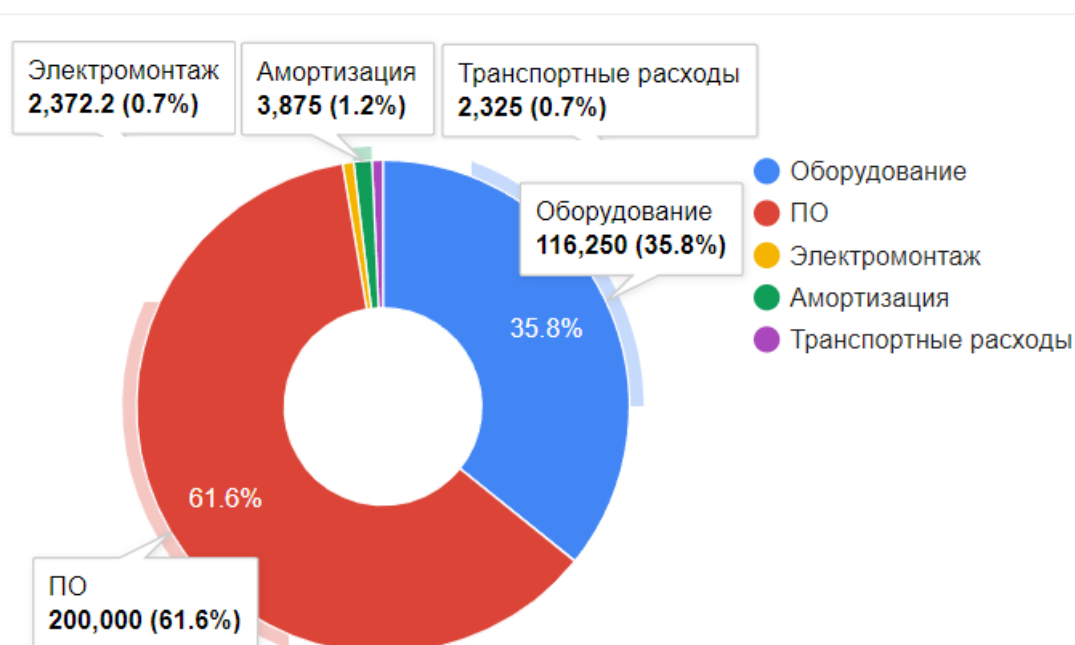


Рисунок 7.1 – Круговая диаграмма расходов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы достигнуты поставленные цели: разработан лабораторный практикум, разработаны принципиальные схемы, реализовано управление в ручном и автоматическом режиме работы, разработана компьютерная модель объекта управления, проведена пусконаладка и определены погрешности перемещений.

В первой главе выпускной квалификационной работы приведено описание объекта управления, которым является промышленный робот НЦТМ-01, и даны основные технические характеристики.

Во второй главе приведено описание системы управления, указаны основные изменения, которые произведены с системой управления.

В третьей главе приведено описание разработанных электрических и пневматических принципиальных схем.

В четвертой главе разработана компьютерная модель объекта управления, на основе которой получены кинематические параметры.

В пятой главе решена задача управления объектом управления путем создания управляющей программы с учетом ограничений и представлен интерфейс взаимодействия.

В шестой главе описаны результаты пусконаладочных работ.

В седьмой главе представлены правила безопасности при работе с роботами-манипуляторами и произведен расчет экономической составляющей проекта робота-манипулятора.

Дальнейшее развитие проекта подразумевает внедрение данного робота в РТС и организацию связи с другими объектами управления.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СУ – система управления
ШВП – шарико-винтовая пара
ПЛК – программируемый логических контроллер
ПЗК – прямая задача кинематики
ОЗК – обратная задача кинематики
РТС – роботизированная технологическая ячейка
ПР – промышленный робот
ПО – программное обеспечение

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка уровня роботизации производства в России [Электронный ресурс] // Официальный сайт университета ВШЭ – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/news/932892785.html>
2. Цифровизация_промышленности в России [Электронный ресурс] // Официальный сайт портала Tadviser. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_промышленности._Обзор_TAdviser
3. Описание робота НЦТМ-01 [Электронный ресурс] // Официальный сайт ОАО «НИИ точного машиностроения» г. Зеленоград – Режим доступа: <http://www.niitm.ru/about/history>
4. Масальский, Г. Б. Математические основы кибернетики: учебное пособие / Г. Б. Масальский. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. - 384 с
5. Описание и характеристики контроллера S7-200 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании SIEMENS – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-200.htm>
6. Характеристики и описание датчика HC-89 [Электронный ресурс] // Интернет магазин «Кулибин» – Режим доступа: <https://kulibin.su/catalog/radiodetali/arduino-moduli/opticheskiedatchiki/shchelevoy-opticheskiy-datchik-hc-89.html>
7. Описание блоков в MATLAB Simulink [Электронный ресурс] // Официальный сайт MATLAB – Режим доступа: https://www.mathworks.com/help/?s_tid=gn_supp
8. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
9. Сборка зубчатой передачи в Simscape [Электронный ресурс] // Официальный сайт MATLAB – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/sm/ug/satisfying-gear-assembly-requirements.html>
10. Pneumatic Actuation Circuit [Электронный ресурс] // Официальный сайт MATLAB – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/pneumatic-actuation-circuit.html>
11. Way 3-Position Directional Valve [Электронный ресурс] // Официальный сайт MATLAB – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/4way3positiondirectionalvalveil.html>
12. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: учебное пособие / Пер. с. Англ. – М. Мир, 1989. – 624 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Разработка лабораторного практикума

Лабораторная работа разработана для программирования промышленного робота НЦТМ-01. Данная лабораторная работа позволит студентам получить навыки работы с ПЛК и на основе чтения принципиальных схем реализовать собственную программу циклового управления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Тема: «Разработка программы циклового управления робота НЦТМ-01»

Цель работы: ознакомиться с принципиальными схемами промышленного робота НЦТМ-01 и запрограммировать для ручного и программного управления.

Краткое теоретическое описание

Робот НЦТМ-01 является промышленным роботом, предназначенный для загрузки – выгрузки токарных станков с ЧПУ и образует со станком гибкую производственную ячейку. Манипулятор робота оснащен гибким комбинированным электромеханическими и пневматическим приводом. На рисунке А.1 представлен общий вид робота НЦТМ-01.

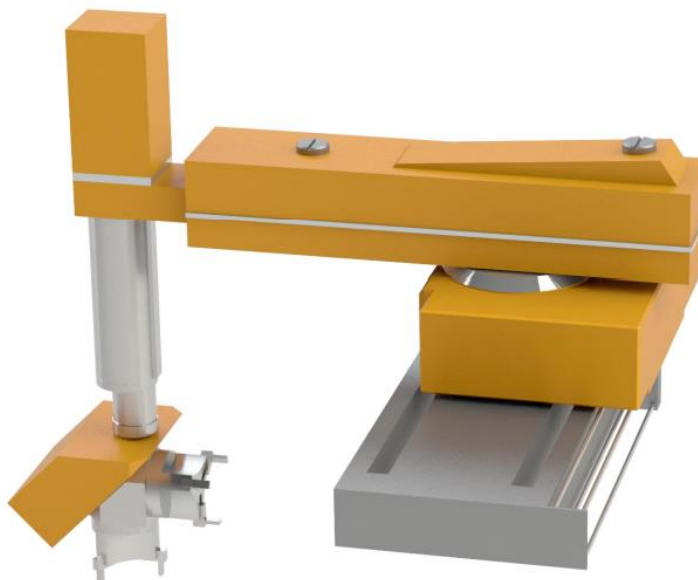


Рисунок А.1 – Промышленный робот НЦТМ-01

Робот должен функционировать в стационарных условиях, в закрытых, отапливаемых помещениях при:

- относительной влажности до 80 при температуре 35 °С и более низких температурах, без конденсации влаги;
- температуре от 10 °С до 35 °С;
- атмосферном давлении 86,66 – 106,66 кПа (650 – 800 мм.рт.ст.).

Электромеханический манипулятор робота имеет пять степеней подвижности и два схвата, расположенных под углом 90°, один настраивается на захват заготовки, другой на захват детали.

Привода по всем степеням подвижности электромеханические, привод схвата – пневматический. На рисунке А.2 приведена кинематическая схема робота.

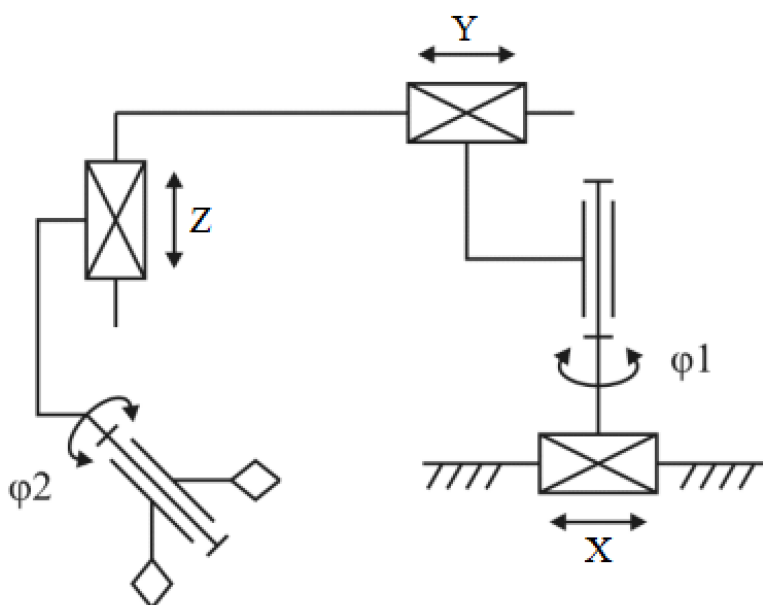


Рисунок А.2 – Кинематическая схема робота

Первое звено робота – перемещающая каретка, которая обеспечивает поступательное движение. Данное звено будет обозначаться как механизм X.

Вращательное звено обеспечивает поворот манипулятора на угол 90 градусов, обозначается как механизм вращения.

Третье звено обеспечивает выдвижение схвата, обозначается как механизм Y.

Четвертое звено – механизм подъема схвата, обозначается как механизм Z/

Пятое звено является вращающим, оно поворачивает два схвата на угол 90 градусов. Обозначается как механизм ротации схватов.

Механизмы X, Y, Z обладают одинаковым электрическим приводом, состоящим из двух двигателей постоянного тока и электромагнитного тормоза.

Рисунок А.3 содержит электрическую принципиальную схему привода.

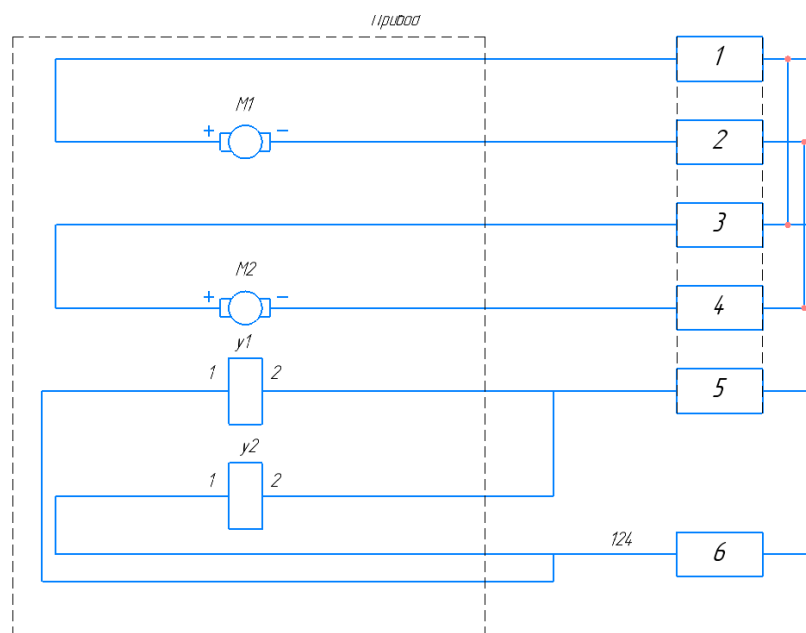


Рисунок А.3 – Электрическая принципиальная схема привода механизмов X, Y, Z

Привод имеет шесть контактов, первые четыре отвечают за питание привода, 5 и 6 контакты – за активацию электромагнитного тормоза. Для того, чтобы два двигателя питались от одного источника и работали одновременно, положительные контакты 1 и 3 замыкаются между собой, как и отрицательные контакты 2 и 4. Привод поддерживает реверсивный режим работы, поэтому для изменения направления вращения двигателя достаточно поменять полярность питающего напряжения.

В качестве привода механизма поворота используется двигатель постоянного тока, который через косозубую зубчатую передачу вращает звено. Для вращения звена достаточно подать напряжение на двигатель. Механизм поворота содержит в себе мальтийский крест – механизм, который ограничивает поворот более, чем на 90 градусов.

Управление схватом осуществляется с помощью электропневматических распределителей. Всего робот содержит три электропневматических распределителя: два используются для сжатия – разжатия схватов, третий – для ротации схватов. Распределители, отвечающие за сжатие схватов, расположены в корпусе робота механизма X. Распределитель ротации схватов расположен в механизме схвата. В таблице А.1 приведены технические характеристики электропневматического распределителя, а на рисунке А.4 общий вид.

Таблица А.1 – Технические характеристики пневмораспределителя

Параметр	Значение
Давление сжатого воздуха	$(3,5 - 6) \cdot 10^5$ Па
Напряжение питания	24 В
Время непрерывной работы	2000 ч
Максимальная частота переключений	100 движ./мин

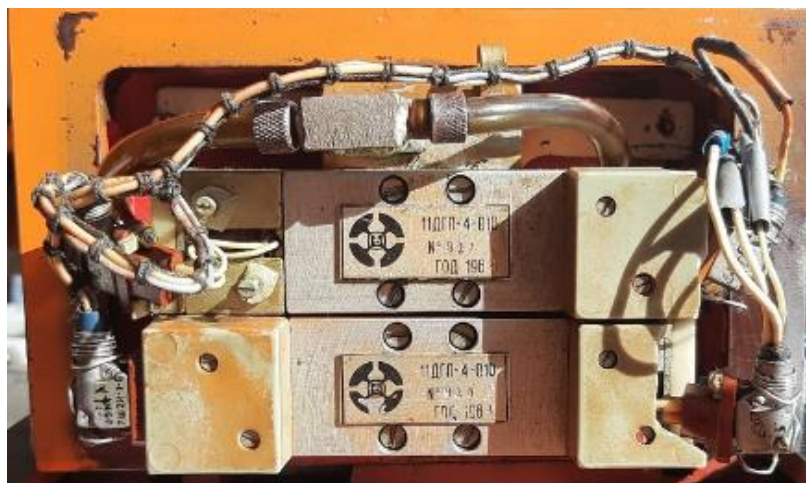


Рисунок А.4 – Электропневматические распределители

Для подключения электропневматического распределителя необходимо подать сжатый воздух через магистраль и включить питание 24 В. Проверить работу распределителей можно вручную, для этого достаточно поочередно нажать на левый и правые клапаны, должно происходить вращение или сжатие схватов в зависимости от распределителя.

Система управления робота является средством управления роботом. На рисунке А.5 приведен общий вид системы управления. Ее можно разделить на 6 основных блоков.

Первый блок – это преобразователь с 220 В переменного напряжения в постоянное напряжение 24 В. Осуществляет питание всех компонентов системы управления.

Второй блок – это непосредственно центральный процессор контроллера CPU224XP и модуль ввода-вывода дискретных сигналов DC24V.

Третий блок – это релейный блок, состоящий из 16 реле. Данный блок используется с целью механической защиты, обеспечивающий обрывание цепи питания и подачи питания на приводы робота. Хотя подача сигналов и регулируется программным образом, в некоторых нештатных ситуациях может возникнуть необходимость в реле, чтобы не допустить подачи лишнего напряжения, например, на датчики.

Четвертый блок – это схема преобразователь DC/DC с 24В на 5В. Он используется для подачи напряжения на датчики и получения сигналов с датчиков.

Пятый блок – два кабеля, подводящие провода к роботу. Один кабель содержит провода, питающие приводы, второй – питающий датчики.

Шестой блок – тумблеры ручного управления, позволяющие активировать входа контроллера для управления роботом.

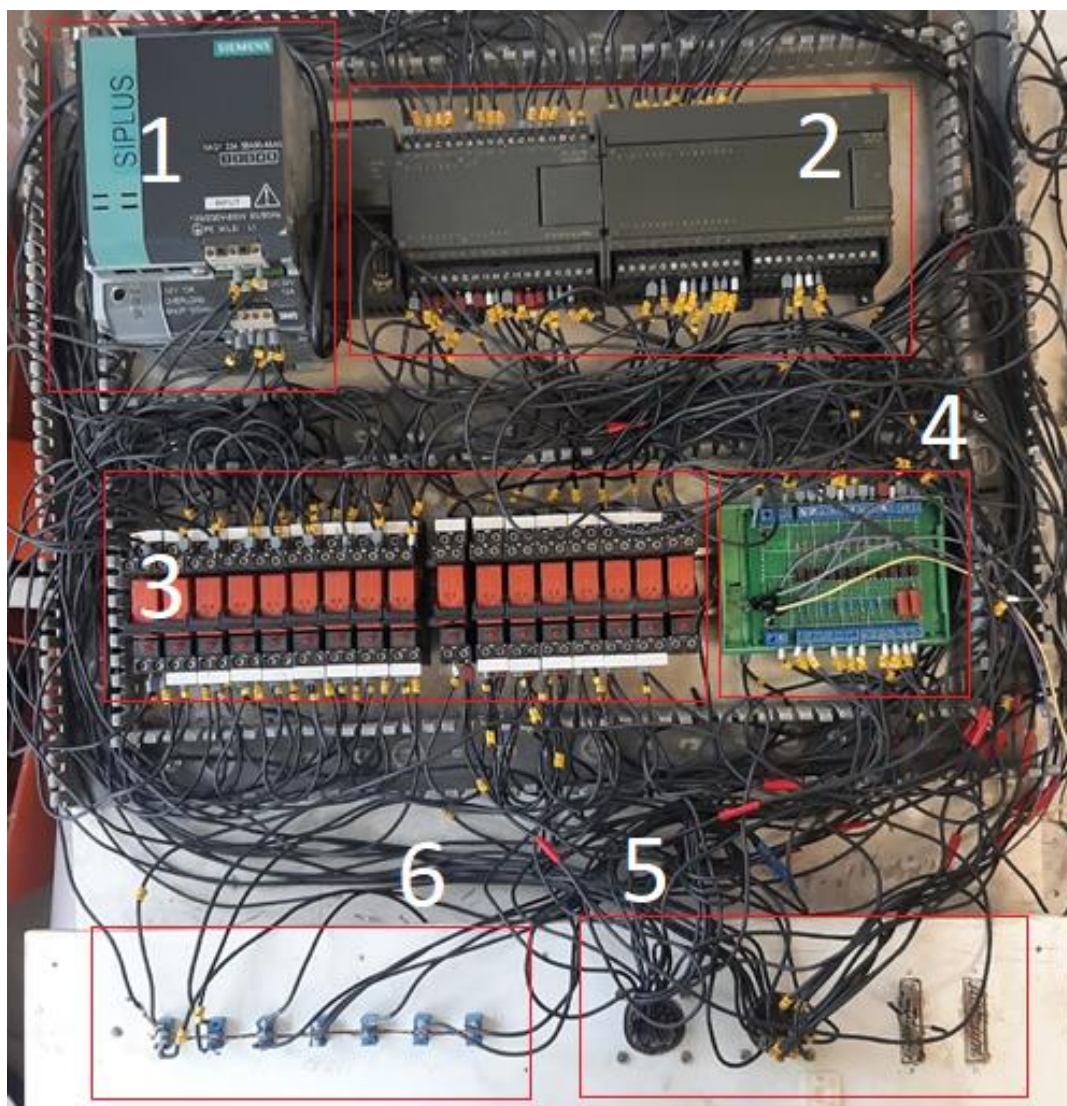


Рисунок А.5 – Общий вид системы управления

Самым важным элементом системы управления является ПЛК S7-200 и его модуль расширения EM223, который добавляет дискретные входы и выходы основному контроллеру.

Электрическая принципиальная схема подключения ПЛК приведена на рисунке А.6, а принципиальная схема подключения модуля расширения на рисунке А.7. В таблице А.2 приведены обозначение выходных адресов ПЛК, в таблице А.3 – обозначение входных адресов ПЛК. В таблице А.4 приведено обозначение выходных адресов модуля расширения EM223, в таблице А.5 – обозначение входных адресов модуля расширения EM223.

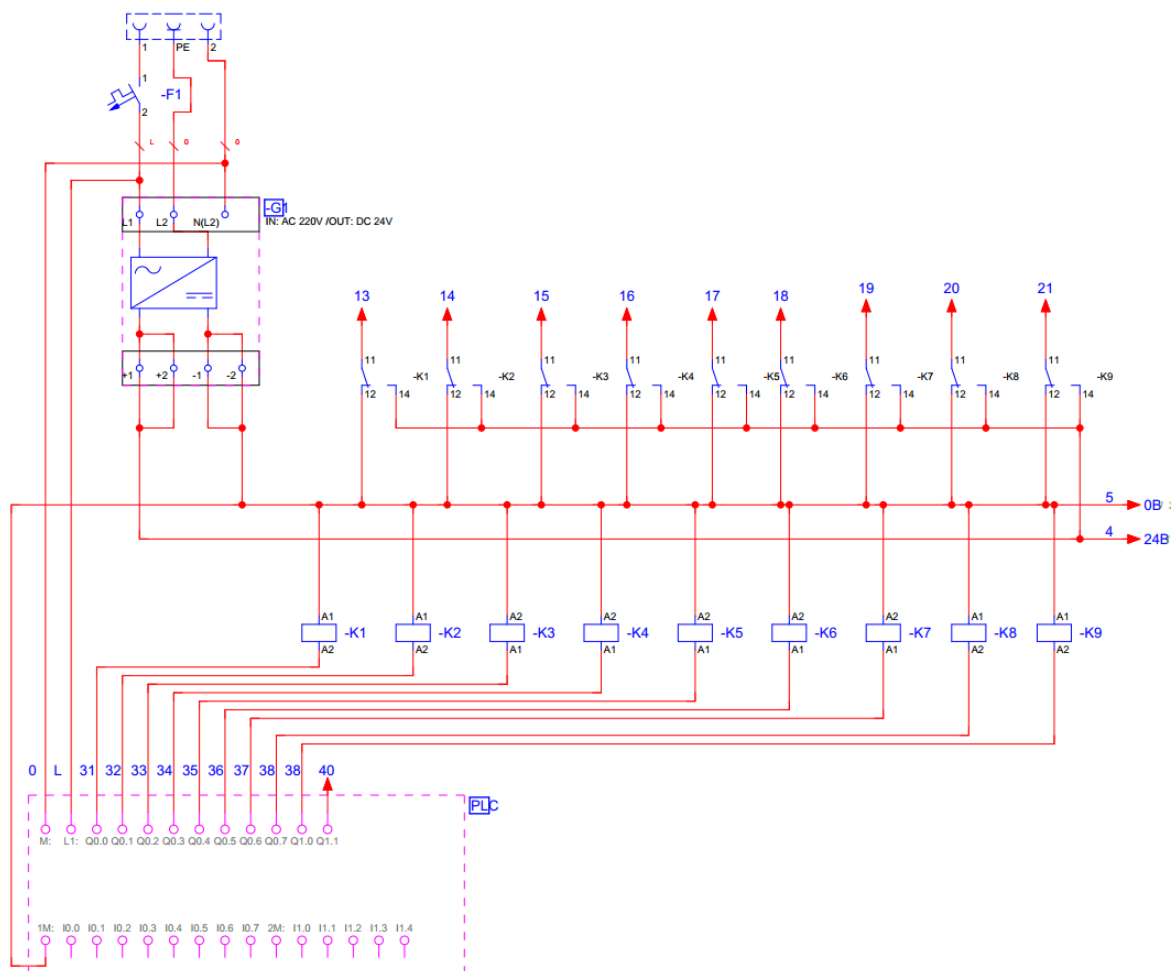


Рисунок А.6 – Принципиальная схема подключения ПЛК

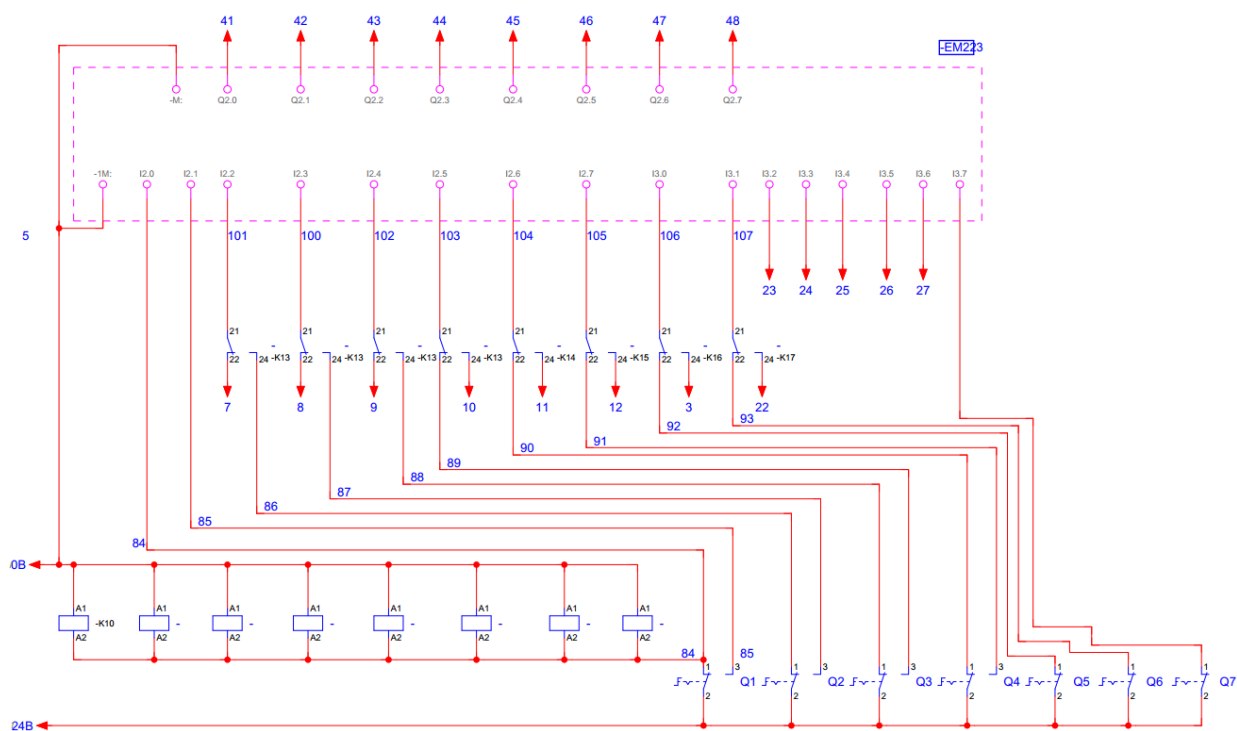


Рисунок А.7 – Принципиальная схема модуля расширения EM223

Таблица А.2 – Обозначение выходных адресов ПЛК

Адрес	Обозначение
Q0.0	Активация подачи напряжения на приводы
Q0.1	Управление движением вперед механизма X
Q0.2	Управление движением назад механизма X
Q0.3	Управление движением вперед механизма Y
Q0.4	Управление движением назад механизма Y
Q0.5	Управление движением вперед механизма Z
Q0.6	Управление движением назад механизма Z
Q0.7	Управление поворотом звена по часовой стрелке
Q1.0	Управление поворотом звена против часовой стрелки
Q1.1	Управление сжатием захвата I

Таблица А.3 – Обозначение входных адресов ПЛК

Адрес	Обозначение
I0.0	Датчик начального положения механизма X
I0.1	Датчик конечного положения механизма X
I0.2	Датчик начального положения механизма Y
I0.3	Датчик конечного положения механизма Y
I0.4	Датчик начального положения механизма Z
I0.5	Датчик начального положения поворота
I0.6	Датчик начального положения поворота

Таблица А.4 – Обозначение выходных адресов модуля расширения EM223

Адрес	Обозначение
Q2.0	Управление разжатием схвата I
Q2.1	Управление сжатием схвата 2
Q2.2	Управление разжатием схвата 2
Q2.3	Управление ротацией схвата
Q2.4	Управление ротацией схвата
Q2.5	Тормоз привода X
Q2.6	Тормоз привода Y
Q2.7	Тормоз привода Z

Таблица А.4 – Обозначение выходных адресов модуля расширения EM223

Адрес	Обозначение
I2.0	Активация управления через тумблеры
I2.1	Активация управления через Arduino
I2.2	Активация тумблером выбора управления
I2.3	Активация движения механизма X тумблером
I2.4	Активация движения в обратном направлении механизма X тумблером
I2.5	Активация движения механизма Y тумблером
I2.6	Активация движения в обратном направлении механизма Y тумблером
I2.7	Активация движения механизма Z тумблером
I3.0	Активация поворота звена тумблером
I3.1	Активация поворота звена в обратном направлении тумблером

Входные адреса ПЛК принимают сигналы с датчиков концевой положения, и за счет этого программным путем следует ограничивать подачу напряжения на приводы, чтобы избежать столкновения звеньев. Выходные адреса ПЛК Q0.0 – Q1.0 подключены к реле и являются активирующими. Реле K1 – K8 обеспечивают питание приводов, что можно увидеть на принципиальной схеме на рисунке А.8.

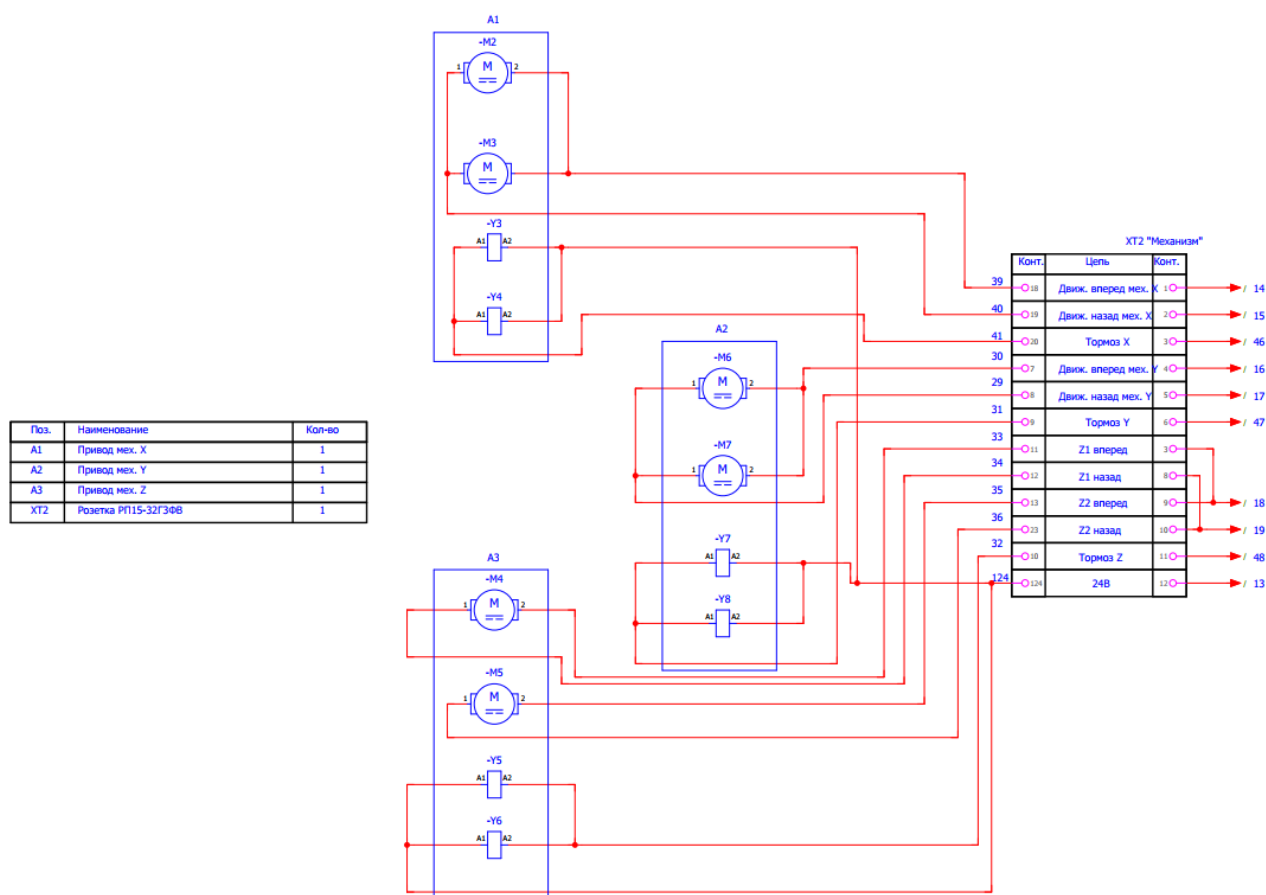


Рисунок А.8 – Принципиальная схема подключения приводов к системе управления

Задание и порядок выполнения работы

1. Разобраться в принципиальных схемам подключения контроллера, модуля расширения EM223 и схемах подключения приводов
2. Разработать программу ручного управления с помощью тумблеров:
 - управление должно происходить согласно командам, отведенным каждому положению тумблера;
 - каждое звено робота должно достигать всех конечных положений по каждой оси, не сталкиваясь с другими частями робота;
3. На данных из таблицы А.5, содержащей векторы времени перемещений, разработать программу циклового управления. В таблице каждому звену соответствует вектор из четырех значений – эти значения показывают, в течение какого времени звено должно перемещаться.

Знак минус означает перемещение в противоположном направлении. Необходимо составить программу, которая последовательно будет перемещать все звенья за указанное время. Перемещение звена по новому значению времени должно начинаться после того, как все звенья закончили перемещения по предыдущему значению времени. Использовать встроенные в ПЛК таймеры для определения времени перемещения звеньев поступательного перемещения; Перед началом запуска программы робот находится в начальном положении: звено механизма X и Y занимают крайнее левое положение, ограниченное датчиками. Механизм Z поднят вверх в конечном положении, механизм поворота не повернут. Обеспечить отключение питания на приводы одним из тумблеров.

4. Сформировать отчет о проделанной работе, отчет должен содержать:
 - принципиальные схемы НЦТМ-01;
 - код программы управления роботом в ручном режиме и на основе заданных времен перемещения каждым звеном.

Таблица А.5 – Данные времени перемещения звеньев по вариантам

Вариант	Время перемещения механизма X, с	Время перемещения механизма Y, с	Время перемещения механизма Z, с
1	[1,5 -1 3 -2,5]	[2 -1 0,5 0]	[1 2 -1 0]
2	[0 2 1 -1]	[0 1 0,5 1]	[0,5 2 -0,5 0]
3	[1 0 -0,5 2]	[1,5 -0,5 2 -2,5]	[1,5 1 -1,5 1]
4	[3 -2 1 0]	[0,6 0,6 0,5 -1,3]	[2 0 -1 -0,5]
5	[1 -0,5 2 1]	[2 0,5 -2 1,8]	[0,5 1 -1 0]
6	[1,5 2 -2 -1]	[2,7 -2 0 2,5]	[0,7 0,8 -1,2 0]
7	[2 1 0 -2]	[2 0 -1,5 1,7]	[0 0 2 0]
8	[0 1,2 2 -1,5]	[0,7 -0,5 2 -1]	[1,3 -0,6 1 -0,8]
9	[2,4 -2 1,5 0]	[1,4 1,2 -2 -0,2]	[2 -1 -0,5 1]
10	[1 0 2 -2]	[0,8 0 1,5 0]	[0,8 0,8 -1 0,5]

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы промышленного робота НЦТМ-01.
2. Описать принцип работы принципиальной схемы привода.
3. Описать принцип подключения принципиальной схемы ПЛК и модуля расширения, объяснить назначение адресов.
4. Объяснить принцип управления роботом в ручном режиме.
5. Описать назначение реле К1 – К8.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы решения ОЗК и ПЗК

```
% Начальные значения
% coord1 - перемещение x механизма
% coord2 - вращение x механизма
% coord3 - перемещение y механизма
% coord4 - перемещение z механизма
coord1 = 0; coord2 = 90; coord3 = 0; coord4 = 0;
coord0 = [coord1, coord2, coord3, coord4];
%необходимые координаты
coord = zeros(length(x), length(coord0));
lb = [0, 0, 0, 0];
ub = [297, 90, 317, 170];
%Aeq = [0, 1, 0, 0];
%beq = [coord2];
A = [0, 1, 0, 0; 0, -1, 0, 0];
b = [90; 90];
R = @(coord) func(coord(1), coord(2), coord(3), coord(4));
%R = @(coord)
    %coord = fminunc(R, coord0);
    coord = fmincon(R, coord0, [], [], [], [], lb, ub);
    %coord = fmincon(R, coord0, [], []);
    % [coord, Q, exitflag, inform] = fminsearch(R, coord0);
point1 = H1(coord(1));
point2 = point1*H2(coord(2));
point3 = point2*H3(coord(3));
point4 = point3*H4(coord(4));
point5 = point4*H5();
function [ Q ] = func(coord1, coord2, coord3, coord4)
ret = H1(coord1)*H2(coord2)*H3(coord3)*H4(coord4)*H5();
dx = ret(1,4)- 372.5;
dy = ret(2,4)- (-486.4);
dz = ret(3,4)-(-120.6);
Q = sqrt(dx^2+dy^2+dz^2);
end
function h1 = H1(coord1)
h1 = [-1 0 0 90+coord1; 0 -1 0 0; 0 0 1 71.5; 0 0 0 1];
end
function h2 = H2(coord2)
h2 = [cosd(180-coord2) -sind(180-coord2) 0 -27; sind(180-coord2) cosd(180-coord2) 0 0;
0 0 1 133; 0 0 0 1];
end
function h3 = H3(coord3)
h3 = [0 0 1 -135+coord3; 1 0 0 0; 0 1 0 34; 0 0 0 1];
end
function h4 = H4(coord4)
h4 = [0 0 1 0; 0 1 0 -299-coord4; -1 0 0 626.25; 0 0 0 1];
end
function h5 = H5()
h5 = [1 0 0 74.826; 0 0 -1 -60.1; 0 1 0 5.5; 0 0 0 1];
end
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Листинг программы передачи данных с Arduino на Matlab

```
#define pinX1 10
#define pinX2 11
#define pinY1 12
#define pinY2 13
#define pinZ1 14
#define pinZ2 15
#define pinRot1 16
#define pinRot2 17
#define ENCX 2
#define ENCY 3
#define ENCZ 18 // 10 - Хвперед 11 - Хназад 12 Увперед 13 Уназад 14
volatile int counX_temp; // 14 Звперед 15 Зназад 16Поворот 0 17 Поворот90
volatile int countY_temp;
volatile int countZ_temp;
float rpmX;
float rpmY;
float rpmZ;
int countX = 0;
int countY = 0;
int countZ = 0;
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    attachInterrupt(0,encoderX,RISING);
    attachInterrupt(1,encoderY,RISING);
    attachInterrupt(2,encoderZ,RISING);
    pinMode(pinX1,OUTPUT);
    pinMode(pinX2,OUTPUT);
    pinMode(pinRot1,OUTPUT);
    pinMode(pinRot2,OUTPUT);
    pinMode(pinY1,OUTPUT);
    pinMode(pinY2,OUTPUT);
    pinMode(pinZ1,OUTPUT);
    pinMode(pinZ2,OUTPUT);
}

void loop() {
    static uint32_t previousMillis
    while (Serial.available())
    {
        uint8_t temp;
        switch (temp) {
            case 1:
                digitalWrite(pinX1,HIGH);
                digitalWrite(pinX2,LOW);
                break;
            case 2: //Y назад
```

```

        digitalWrite(pinX2,HIGH);
        digitalWrite(pinX1,LOW);
        break;
    case 3: // Y вперед
        digitalWrite(pinY1,HIGH);
        digitalWrite(pinY2,LOW);
        break;
    case 4: // Y назад
        digitalWrite(pinY2,HIGH);
        digitalWrite(pinY1,LOW);
        break;
    case 5: // Z вниз
        digitalWrite(pinZ1,HIGH);
        digitalWrite(pinZ2,LOW);
        break;
    case 6: // Z вверх
        digitalWrite(pinZ2,HIGH);
        digitalWrite(pinZ1,LOW);
        break;
    case 7: // поворот 0
        digitalWrite(pinRot1,HIGH);
        digitalWrite(pinRot2,LOW);
        break;
    case 8: // поворот 0
        digitalWrite(pinRot2,HIGH);
        digitalWrite(pinRot1,LOW);
        break;
    }
}

if (millis() - previousMillis >= 1000)
{
    rpmX = (float(counX_temp)/12)*60;
    rpmY = (float(counY_temp)/12)*60;
    rpmZ = (float(counZ_temp)/12)*60;
    countX = 0;
    previousMillis += 1000;
    Serial.write(countX);
    Serial.write(countY);
    Serial.write(countZ);
    Serial.write(rpmX);
    Serial.write(rpmY);
    Serial.write(rpmZ);
}

void encoderX(){
    countX = counX_temp+1;
}

void encoderY(){
    countY = counX_temp+1;}

void encoderZ(){
    countZ = counX_temp+1;
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинг программы управления роботом НЦТМ-01

<pre>//SUBROUTINE программа Network 1 LD SM0.1 LPS MOVW 10, VW100 AENO MOVW 10, VW150 LRD MOVW 10, VW200 AENO MOVW 10, VW250 LRD MOVW 10, VW300 AENO MOVW 10, VW350 LPP MOVW 10, VW500 AENO MOVW 10, VW550 Network 2 LD I2.0 O I2.1 LPS A I2.2 AN I0.0 = Q0.1 LRD A I2.3 AN I0.1 = Q0.2 LRD A I2.4 AN I0.3 = Q0.3 LRD A I2.5 AN I0.2 = Q0.4 LRD</pre>	<p>Основная</p>	<pre>A I2.6 = Q0.5 LRD A I2.7 AN I0.4 = Q0.6 LRD A I3.0 AN I0.5 = Q0.7 LRD A I3.1 AN I0.6 = Q1.0 LRD A I3.2 = Q2.1 LPP = Q0.0 Network 3 LD I2.0 CALL TIMER_X:SBR0 CALL TIMER_Y:SBR8 CALL TIMER_Z:SBR9 CALL TIMER_ROT:SBR3 Network 4 LD Q0.3 EU MOVD HC2, Y_temp:VD418 AENO CALL Y_UP:SBR1 Network 5 LD Q0.4 EU MOVD HC2, Y_temp:VD418 AENO CALL Y_DOWN:SBR2</pre>
--	-----------------	--

```

Network 6
LD    Q0.2
EU
MOVD  HC1, X_temp:VD428
AENO
CALL  X_UP:SBR6

```

```

Network 7
LD    Q0.1
EU
MOVD  HC1, X_temp:VD428
AENO
CALL  X_DOWN:SBR4

```

```

Network 8
LD    Q0.5
EU
MOVD  HC2, Z_temp:VD432
AENO
CALL  Z_UP:SBR5

```

```

Network 9
LD    Q0.6
EU
MOVD  HC2, Z_temp:VD432
AENO
CALL  Z_DOWN:SBR7

```

```

//SUBROUTINE Таймер ось X
Network 1
LD    Q0.2
O     Q0.1
TON   T34, 0
MOVW  T34, Current_time_X:VW400
AENO
ITD    Current_time_X:VW400,
X_time:VD414
AENO
DTR    X_time:VD414, X_time:VD414
AENO
/R     100.0, X_time:VD414

```

```

Network 2
LDN   Q0.2

```

```

EU
ATT    Current_time_X:VW400,
VW100
ATT    0, VW150

```

```

Network 3
LDN   Q0.1
EU
ATT    Current_time_X:VW400,
VW200
ATT    0, VW100

```

//SUBROUTINE Таймер ось Y

```

Network 1
LD    Q0.3
O     Q0.4
TON   T35, 0
MOVW  T35, Current_time_Y:VW402
AENO
ITD    Current_time_Y:VW402,
Y_time:VD406
AENO
DTR    Y_time:VD406, Y_time:VD406
AENO
MOVR    Y_time:VD406,
X_time:VD414

```

```

Network 2
LDN   Q0.3
EU
ATT    Current_time_Y:VW402,
VW200
ATT    0, VW250

```

```

Network 3
LDN   Q0.4
EU
ATT    0, VW200
ATT    Current_time_Y:VW402,
VW250

```

//SUBROUTINE Таймер ось Z

```

Network 1
LD    Q0.5

```

```

O    Q0.6
TON  T36, 0
MOVW T36, Current_time_Z:VW404
AENO
ITD      Current_time_Z:VW404,
Z_time:VD410
AENO
DTR  Z_time:VD410, Z_time:VD410
AENO
/R    100.0, Z_time:VD410

```

Network 2

```

LDN  Q0.6
EU
ATT  0, VW300
ATT      Current_time_Z:VW404,
VW350

```

Network 3

```

LDN  Q0.6
EU
ATT  0, VW300
ATT      Current_time_Z:VW404,
VW350

```

//SUBROUTINE Таймер ось вращения

```

Network 1
LD  Q0.7
O   Q1.0
TON  T33, 0
MOVW T33,
Current_time_Rot:VW422
AENO
ITD      Current_time_Rot:VW422,
Rot_temp:VD424
AENO
DTR  Rot_temp:VD424,
Rot_temp:VD424
AENO
/R    100.0, Rot_temp:VD424

```

Network 2

```

LDN  Q0.7

```

```

EU
ATT      Current_time_Rot:VW422,
VW500
ATT  0, VW550

```

Network 3

```

LDN  Q1.0
EU
ATT      Current_time_Rot:VW422,
VW550
ATT  0, VW500

```

//SUBROUTINE Счетчик ось X UP

```

Network 1
LD  SM0.0
MOVB 16#F8, SMB47      //Set
control bits: count UP; enabled;
MOVD  X_temp:VD428, SMD48
//Load CV
MOVD  +0, SMD52      //Load
PV
HDEF  1, 0
ENI
HSC  1

```

//SUBROUTINE Счетчик ось X Down

```

Network 1
LD  SM0.0
MOVB 16#F0, SMB47      //Set
control bits: count DOWN; enabled;
MOVD  X_temp:VD428, SMD48
//Load CV
MOVD  +0, SMD52      //Load
PV
HDEF  1, 0
ENI
HSC  1

```

//SUBROUTINE Счетчик ось Y UP

```

Network 1
LD  SM0.0
MOVB 16#F8, SMB57      //Set
control bits: count UP; enabled;

```

```

MOVD      Y_temp:VD418, SMD58
//Load CV
MOVD  +0, SMD62          //Load
PV
HDEF  2, 0
ENI
HSC   2

```

```

//SUBROUTINE  Счетчик ось Y
DOWN
Network 1
LD      SM0.0
MOVB  16#F0, SMB57      //Set
control bits: count DOWN; enabled;
MOVD      Y_temp:VD418, SMD58
//Load CV
MOVD  1000, SMD62        //Load
PV
HDEF  2, 0
ENI
HSC   2

```

```

//SUBROUTINE Счетчик ось Z UP
Network 1
LD      SM0.0
MOVB  16#F8, SMB37      //Set
control bits: count UP; enabled;
MOVD      Z_temp:VD432, SMD38
//Load CV
MOVD  +0, SMD42          //Load
PV
HDEF  0, 0
ENI
HSC   0

```

```

//SUBROUTINE  Счетчик ось Z
DOWN
Network 1
LD      SM0.0
MOVB  16#F0, SMB37      //Set
control bits: count DOWN; enabled;
MOVD      Z_temp:VD432, SMD38
//Load CV

```