

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт Механико-технологический факультет
Кафедра «Мехатроника и робототехника»
Направление «Мехатроника и робототехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2018 г.

Модернизация мехатронной системы автооператоров линии гальванизации
ТПЦ №1 ПАО «ЧТПЗ»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ _____ 15.04.06.2018.1542 _____ ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Руководитель работы
к.т.н., доцент
С.Н. Басков

Нормоконтролер
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2018 г.

Автор работы
студент группы П-264
Олег Викторович Вурьев

2018 г.

АННОТАЦИЯ

Вурьев О.В. Модернизация мехатронной системы автооператоров линии гальванизации ТПЦ №1 ПАО «ЧТПЗ» – Челябинск: ЮУрГУ, МТ-264; 2018, 71 с. 14 ил., 16 табл., библиогр. список – 8 наим., 11 прил.

Целью работы является модернизация мехатронной системы автооператоров линии гальванизации.

Работа содержит описание объекта автоматизации, его литературный обзор, функциональную схему системы управления, электрическую схему шкафа приводов, расчёт электропривода горизонтального перемещения, его математическую модель, результаты моделирования переходных процессов данного электропривода и алгоритм работы системы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ.....	8
1.1 Технологический процесс участка оцинковки муфт ТПЦ №1	8
1.1.1 Технологический процесс участка изготовления муфт	8
1.1.2 Участок оцинковки муфт	8
1.2 Литературный обзор	15
1.3 Описание объекта автоматизации	17
1.4 Формирование требований к системе управления	19
1.5 Разработка функциональной схемы	20
2 ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	22
2.1 Выбор и проверка двигателя горизонтального перемещения.....	22
2.2 Выбор и проверка двигателя вертикального перемещения.....	25
2.3 Проверка и выбор силового оборудования автооператоров	28
2.4 Проверка и выбор элементов защиты автооператоров	31
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	33
3.1 Выбор энкодера привода горизонтального перемещения автооператора	33
3.2 Выбор датчиков верхнего и нижнего положения подвески автооператора	35
3.3 Выбор электромеханических выключателей	35
3.4 Выбор программируемого логического контроллера и периферии ..	36
3.5 Построение системы автоматического регулирования	46
3.5.1 Определение коэффициентов цепей обратных связей.....	47
3.5.2 Определение параметров механического звена электропривода ...	48
3.5.3 Определение звена электродвигателя.....	51
3.5.4 Построение контура регулирования скорости	51
3.5.5 Построение контура регулирования положения	54

3.5.5.1 Построение регулятора положения при отработке малых перемещений.....	55
3.5.5.2 Построение регулятора положения при отработке больших перемещений.....	57
3.5.5.3 Построение регулятора положения при отработке средних перемещений.....	58
3.6 Моделирование переходных процессов электропривода.....	61
4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	71
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Схема технологических операций	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. План участка оцинковки муфт ТПЦ №1	
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Схема объекта автоматизации	
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Схема функциональная	
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Схема электрическая привода перемещения	
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Математическая модель привода перемещения	
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Результаты моделирования привода перемещения	
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Алгоритм работы программы регулятора положения	
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Листинг программы регулятора положения	
ПРИЛОЖЕНИЕ М. Алгоритм функционирования системы управления	
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Листинг программы системы управления	

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе описывается модернизация мехатронной системы автооператоров линии гальванизации. Мехатронная система автооператоров линии гальванизации предназначена для перемещения муфт от площадки загрузки до площадки выгрузки группами по 4 муфты последовательно через 18 ванн, в каждой из которых выполняется своя операция согласно технологическому процессу гальванизации.

Основными целями модернизации мехатронной системы автооператоров линии гальванизации являются:

- снижение трудоёмкости ремонта датчиков положения;
- облегчение процесса задания положений ванн;
- повышение надёжности мехатронной системы и снижение времени её ремонта;
- увеличение производительности мехатронной системы.

В выпускной квалификационной работе представлены: схема объекта автоматизации, схема участка оцинковки муфт, схема технологических операций, схема функциональная, схема электрическая шкафа приводов, алгоритм работы системы управления, математическая модель привода горизонтального перемещения и результаты моделирования его переходных процессов.

1 АНАЛИЗ ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1 Технологический процесс участка оцинковки муфт ТПЦ №1

1.1.1 Технологический процесс участка изготовления муфт

Заготовка в виде трубы по рольгангам отправляется на трубоотрезной станок, отрезающий трубы нужной длины. Далее заготовки отправляются на резьбонарезной станок, где нарезается внутренняя резьба.

По завершению данной операции заготовки отправляются на участок технического контроля, на котором проверяется диаметр муфт и состояние резьбы. Затем заготовки прошедшие контроль отправляются на дефектоскоп магнитопорошковый, где, посредством магнитного поля, проверяется качество заготовки. После этого, заготовка отправляется на участок оцинковки муфт.

Оцинкованные муфты складываются в муфтодержатель партиями по 6 штук и отправляются на муфтонавёрточный станок, где муфты накручиваются на трубы соответствующего диаметра.

Транспортировка муфт между всеми участками, кроме муфтонавёрточного станка, осуществляется посредством транспортных желобов.

Рассмотрим подробнее участок оцинковки муфт.

1.1.2 Участок оцинковки муфт

Гальваническое цинкование – эффективный способ защиты металла.

Нанесение на железо слоя цинка – самый распространенный способ его защиты от коррозии. Гальваническое цинкование получило наиболее широкое распространение благодаря преимуществам технологии и получаемых защитных покрытий.

Цинкование является наиболее распространенным способом защиты железа поверхностной металлизацией от атмосферной коррозии. Примерно 40 % общего

объема добычи цинка в мире за год расходуется для этих целей. Данный способ защиты железа стал так широко распространён благодаря тому, что создаваемая цинком защита имеет анодный характер.

За счёт того, что электрохимический потенциал цинка меньше электрохимического потенциала черных металлов (железа, стали, чугуна), цинк хорошо защищает последние от коррозии электрохимическим способом. Ещё одна особенность защитных свойств покрытий из цинка заключается в том, что данные свойства проявляются даже в том случае, если толщина покрытия будет незначительной толщины покрытия или даже при наличии обнаженных участков, пор. Примером подобной защиты цинком непокрытых участков стальных изделий являются обрезанные проволока в поперечном сечении, края оцинкованного листового железа, резьба гайки без покрытия, навинченной на оцинкованный болт.

Стоит заметить, что анодный характер взаимодействия со сталью и внешней средой при некоторых условиях может измениться на катодный что приведёт к тому, что коррозионные процессы в железе будут происходить наоборот более интенсивно. Подобный эффект может наблюдаться, например, если на покрытие воздействует горячая вода, нагретая более чем до 70 °С, что можно наблюдать в котельных установках.

Все воздействия внешней среды цинковое покрытие берёт на себя, при этом при окислении цинка на его поверхности образуется тонкая плотная оксидная пленка, которая препятствует проникновению кислорода в более глубокие слои цинка. Благодаря данному эффекту окисление металла останавливается.

Химическая стойкость цинкового покрытия может снизиться, если на него будут воздействовать летучие продукты, выделяющиеся при старении следующих органических материалов:

- олифов;
- синтетических смол;
- хлорированных углеводов.

Также, покрытия подвергаются легкому разрушению при контакте или нахождении в закрытом объеме с промасленными или свежеекрашенными деталями.

Не малое влияние на быстроту протекания реакций окисления цинковых покрытий может оказывать показатель среды рН. При значениях рН 7–12 (щелочная среда) цинк практически не растворяется. Однако, отклонение от указанных значений показателя среды может приводить к увеличению скорости корродирования. Особенно сильно скорость коррозии цинковых покрытий возрастает в атмосфере тропиков и промышленных городов.

Защитное действие цинковых покрытий в основном определяется их толщиной, которая устанавливается в соответствии с конкретными условиями эксплуатации металлических изделий и равномерностью нанесения данных покрытий.

Различные способы цинкования позволяют получать различную толщину покрытия, которая колеблется от 5 мкм (при гальваническом цинковании) до 1,5 мм. При гальваническом способе металлизации большое влияние на качество защитного слоя оказывает характер используемого электролита, применяемого для цинкования.

Защитные свойства цинка могут быть значительно увеличены посредством различных способов, самыми распространенными среди которых являются следующие:

- пассивирование (хроматирование) – создание на поверхности цинкового покрытия хроматных пленок посредством химической обработки изделий в растворах с хромовой кислотой либо ее солями;
- фосфатирование – создание на поверхности цинкового покрытия фосфатной пленки посредством обработки оцинкованных заготовок в растворах солей фосфорной кислоты;
- покраска – нанесение лакокрасочных покрытий (лучшие результаты достигаются, если предварительно провести фосфатирование).

Гальваническое цинкование является разновидностью электролитических методов нанесения покрытий, в котором тонкий защитный слой цинка наносится на предварительно подготовленную поверхность изделия и который позволяет получать покрытия толщиной 5–40 мкм.

Однако в условиях масштабного производства полосы, листа или штрипса толщина может достигать 500 мкм. Сам процесс образования покрытия заключается в осаждении на покрываемом изделии (которое является катодом) положительно заряженных ионов цинка из водных растворов его соединений (электролитов) при пропускании постоянного электрического тока через раствор. Аноды, применяемые в данном способе, должны быть из цинка, чтобы восполнять в электролите разряжающиеся на изделиях ионы. В зависимости от выбранного режима ток должен иметь катодную плотность в диапазоне 1–5 А/дм².

Цинкование гальваническим методом имеет свои преимущества и недостатки.

Электролитический способ нанесения цинка является более распространённым методом по сравнению с другими методами и имеет следующие преимущества:

- высокая производительность;
- низкая себестоимость;
- достаточно высокий уровень защиты изделий;
- равномерность покрытия без потеков, капель, с сохранением формы и размеров изделия;
- возможность нанесения цинка на все участки изделий с любой сложной формой, включая различные поры;
- получение декоративных защитных покрытий (гладких, блестящих), не требующих дополнительной обработки.

На данном участке над муфтами производятся следующие технологические операции:

- Химическая обработка в обезжиривающих и щелочных растворах.
- Промывка в тёплой воде.
- Электролитическое обезжиривание на катоде.

- Электролитическое обезжиривание на аноде.
- Каскадная промывка, сначала в тёплой воде, затем в холодной.
- Травление в растворе воды и соляной кислоты. Позволяет удалить оставшиеся окалину и ржавчину без растворения основного металла. При этом происходит декапирование поверхности – активация перед цинкованием.
- Каскадная промывка, сначала кратковременно в холодной воде в одной ванне, затем в холодной воде в другой ванне.
- Цинкование.
- Уливливание. Для возврата не осевшего цинка в производство.
- Каскадная промывка, сначала в холодной воде в одной ванне, затем кратковременно в холодной воде в другой ванне.
- Промывка в горячей воде.
- Сушка.

В приложении А приведена схема технологических операций автоматической линии гальванизации, а в приложении Б приведён план участка оцинковки муфт.

Исходя из приложения А и Б видно, что автоматическая линия гальванизации включает в себя 18 ванн. Три ванны являются спаренными (каскадные, для промывки в тёплой и холодной воде) для сокращения времени перемещения автооператора между ваннами. К ваннам для обезжиривания на аноде и на катоде, к ваннам цинкования и ванной улавливания подведены источники тока FlexKraft с возможностью разрешения или запрета подачи тока дистанционно с контроллера по линии Profibus. В данный момент включение и отключение тока осуществляется вручную.

Перемещение муфт между ваннами осуществляется партиями по 4 штуки посредством автооператора с закреплённой на нём подвеской, имеющей 4 места для зацепления и транспортировки муфт. Их схемы функциональной видно, что на линии одновременно может находиться до 8 подвесок.

Всего на линии два автооператора. Первый перемещается с 1 по 7 ванну, второй – с 6 по 18-ю ванну.

Также имеются площадки с устройствами загрузки и выгрузки муфт. Устройство загрузки последовательно устанавливает пришедшие по транспортным желобам муфты на исходные позиции по 4 штуки, после чего их забирает автооператор. Устройство выгрузки выгружает последовательно муфты, доставленные автооператором на транспортный желоб, доставляя их к муфтодержателю.

На рисунке 1 приведена схема устройства автооператора.

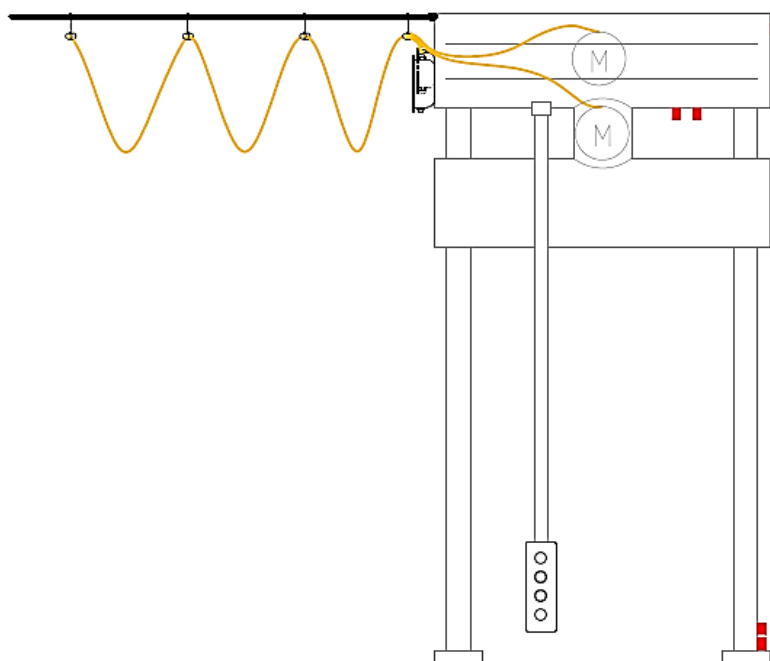


Рисунок 1 – Схема автооператора

Автооператор включает в себя двигатель для перемещения между ваннами, двигатель для подъема и опускания муфт, пульт дистанционного управления, перемещающийся вместе с автооператором, различные датчики положения, а также датчики, предотвращающие столкновение между автооператорами.

Двигатели имеют следующие характеристики:

- Двигатель горизонтального хода:
 - напряжение питания: 380 В;
 - мощность: 0,27 кВт;
 - скорость вращения: 1400 об/мин.

- Двигатель вертикального хода:
 - напряжение питания: 380 В;
 - мощность: 1,7 кВт;
 - скорость вращения: 1420 об/мин.

Основные характеристики автооператора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики автооператора

Параметр	Значение
Тип автооператора (крана)	тельферный
Грузоподъёмность при продолжительности включения 25% и числе включений в час 120, кг	900
Скорость передвижения, м/мин	17
Скорость подъёма, м/мин	8
Масса без груза, кг	402

Перемещение автооператора между ваннами контролируется посредством концевых датчиков, расположенных вдоль балки, по которой перемещается автооператор.

Данные датчики имеют низкую надёжность и быстро теряют работоспособность, а трудоёмкость их ремонта или замены высока, что является значительной проблемой в работе участка.

Главной целью последующей модернизации является решение данной проблемы путём замены концевых датчиков, установленных вдоль балки, абсолютными или инкрементными энкодерами с тросовыми барабанами, установленными у её края, и соединёнными тросиком одним концом с автооператором, а другим – с барабаном тросиковой системы энкодера. Позиции для остановки автооператора будут задаваться программно.

1.2 Литературный обзор

В ходе проведения литературного обзора с целью выяснить, как решались такие проблемы на других предприятиях, было выявлено, что на системы управления автооператорами на линиях гальванизации имеется 4 патента.

В патенте №86179 рассмотрен автооператор, отличительными признаками которого является то, что складывающийся подвес выполнен из попарно параллельных взаимно расположенных в форме раздвижного параллелограмма балок. Балки подвижно на осях соединены между собой с ходовой тележкой и с кареткой. Ходовая тележка и каретка содержат направляющие с ползунами. Ползуны соединены с балками. Подвес выполнен в форме секций, соединенных осями и стяжками. Гибкий элемент выполнен в форме ленты из химстойкого полимерного материала. Лента перекинута через поддерживающие ролики, расположенные на тележке. Лента пропущена через петли на каретке и закреплена на этой каретке.

Предлагаемое техническое решение позволяет расширить технологические возможности автооператора за счет:

- уменьшения габаритов конструкции при верхнем положении каретки, что позволяет устанавливать более высокие перегородки между ваннами;
- использования принципа модульной конструкции, что позволяет на базе одного автооператора путем добавления еще одного комплекта балок получить автооператор с большей глубиной опускания каретки;
- отсутствия жестких ограничений по длине и ширине перемещаемых грузов, так как в автооператоре отсутствуют вертикальные направляющие;
- использования автооператора в линиях нанесения лакокрасочных покрытий и линиях по транспортировке изделий;
- повысить надежность и долговечность автооператора, за счет использования в конструкции подъемной химстойкой ленты из полимерного материала, что уменьшает аварийные ситуации, ремонтные и профилактические работы.

В патенте №2415767 дополняется описание предыдущего патента.

Автооператор содержит ходовую тележку (1) с катками, привод для ее горизонтального перемещения (16), привод (17) с барабаном и закрепленным на нем гибким элементом (21) для вертикального перемещения каретки (15), несущей грузозахватный орган (18), и складывающийся подвес. Подвес выполнен из соединенных стяжками (31) попарно параллельных балок (4, 5, 6, 7) в форме раздвижного параллелограмма. Ходовая тележка и каретка содержат направляющие с ползунами, подвижно соединенных с балками. Гибкий элемент перекинут через поддерживающие ролики на ходовой тележке, пропущен через петли, расположенные на каретке, и закреплен на ней прижимом. Обеспечивается компактная конструкция, расширение технологических возможностей и повышение надежности в работе автооператора.

На рисунке 2 приведено устройство автооператора по патенту №2415767.

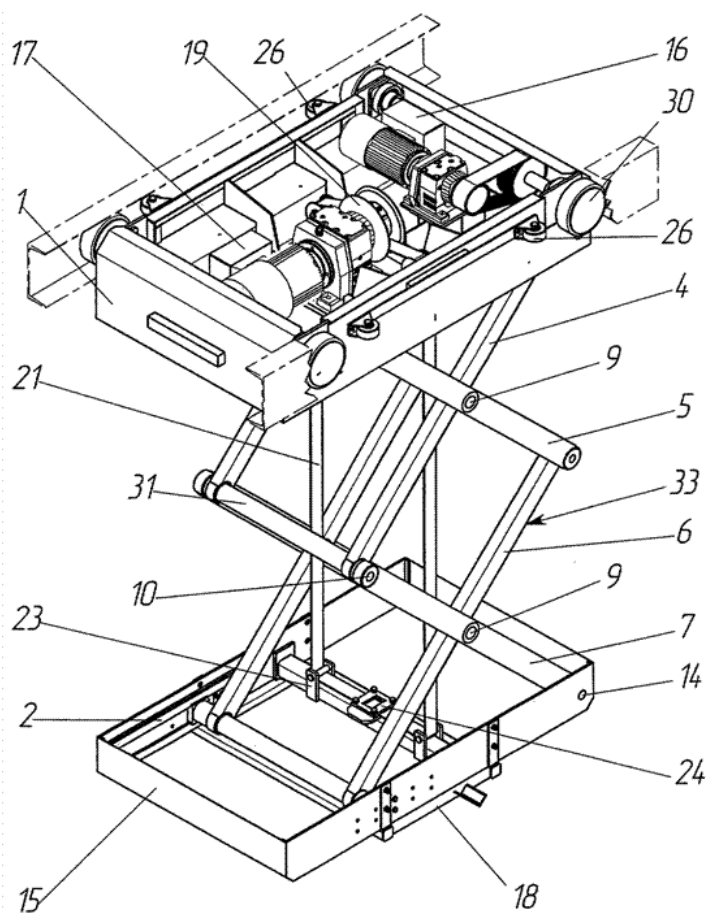


Рисунок 2 – Устройство автооператора по патенту №2415767

В патенте №127050 автооператор содержит корпус в виде рамы, каретку с захватами, механизм горизонтального перемещения, механизм подъема. В механизме горизонтального перемещения приводные колеса установлены на короткие валы, соединенные между собой карданным валом. Также механизм подъема содержит барабаны для намотки ленты, установленные на короткие валы, соединенные с мотор-редуктором карданными валами. Каретка содержит опоры из сверхвысокомолекулярного полипропилена и перемещается по вертикальным направляющим корпуса, выполненным из полипропиленовой трубы. Применение карданных валов ведет к отсутствию деформаций и влияния перекосов валов на работоспособность устройства, повышает его надежность, упрощает конструкцию.

В патенте №2415767 автооператор содержит ходовую тележку с катками, привод для ее горизонтального перемещения, привод с барабаном и закрепленным на нем гибким элементом для вертикального перемещения каретки, несущей грузозахватный орган, и складывающийся подвес. Подвес выполнен из соединенных стяжками попарно параллельных балок в форме раздвижного параллелограмма. Ходовая тележка и каретка содержат направляющие с ползунами, подвижно соединенных с балками. Гибкий элемент перекинут через поддерживающие ролики на ходовой тележке, пропущен через петли, расположенные на каретке, и закреплен на ней прижимом. Обеспечивается компактная конструкция, расширение технологических возможностей и повышение надежности в работе автооператора.

1.3 Описание объекта автоматизации

Схема объекта автоматизации приведена на рисунке 3 и в приложении В.

Исходя из рисунка 3 видно, что автоматическая линия гальванизации включает в себя 18 ванн V1 – V18, две площадки P1 и P2 для загрузки и выгрузки муфт соответственно и два автооператора, имеющих возможность перемещаться

по балке в горизонтальном направлении, а также поднимать и опускать муфты в вертикальном направлении.

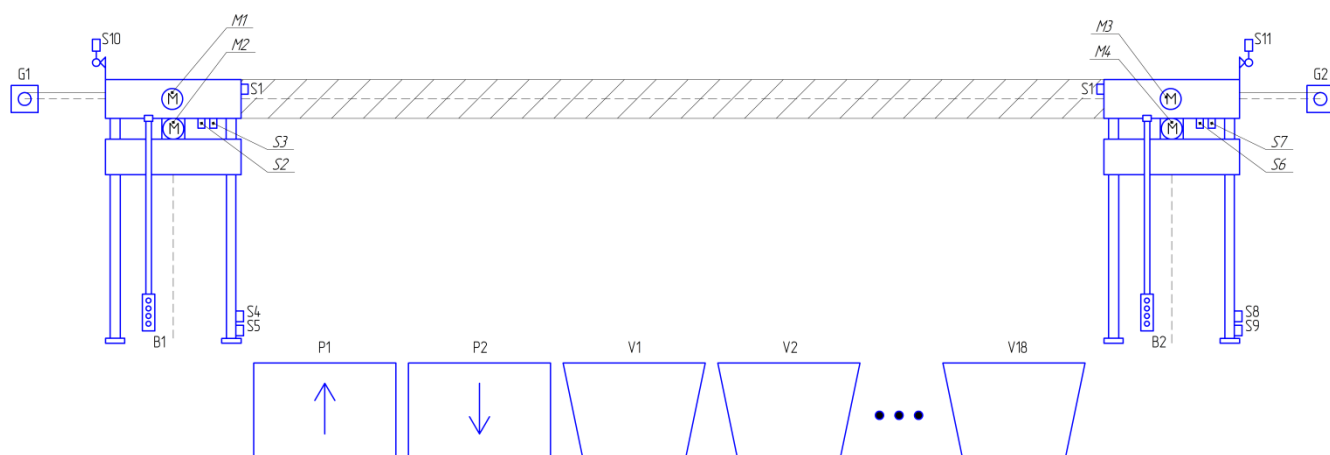


Рисунок 3 – Схема объекта автоматизации

Исходя из рисунка 3 видно, что автоматическая линия гальванизации включает в себя 18 ванн V1 – V18, две площадки P1 и P2 для загрузки и выгрузки муфт соответственно и два автооператора, имеющих возможность перемещаться по балке в горизонтальном направлении, а также поднимать и опускать муфты в вертикальном направлении.

Каждый автооператор включает в себя два двигателя. Двигатели M1 и M3 предназначены для горизонтального перемещения автооператоров, а двигатели M2 и M4 – для вертикального перемещения. На каждом автооператоре имеется пульт дистанционного управления (B1 и B2), перемещающийся вместе с автооператором. Также на автооператорах имеются различные датчики.

Датчики S2 и S6 являются датчиками верхнего положения автооператоров, а датчики S4 и S8 – датчиками нижнего положения.

Рядом с данными датчиками располагаются электромеханические выключатели S3, S5, S7 и S9, выключающие автооператоры в случае их выхода за предельно нижнее и верхнее положение для предотвращения повреждения датчиков положения и механизмов автооператоров.

Электромеханический выключатель S1 предназначен для предотвращения столкновения автооператоров. Сам датчик устанавливается на первом автооператоре, а кулачок для контакта с ним – на втором.

Электромеханические выключатели S10 и S11 предназначены для предотвращения выхода автооператоров за пределы рабочей зоны, поскольку это может привести к их дальнейшей неработоспособности.

Контроль горизонтального положения автооператоров осуществляется посредством абсолютных энкодеров с тросовым барабаном G1 и G2, соединённых тросиками с корпусами автооператоров и поддерживающих эти тросики всегда в натянутом положении, что позволяет однозначно в любой момент времени определять положения автооператоров.

1.4 Формирование требований к системе управления

Составим требования к системе управления в целом, а также к функциям, выполняемым данной системой.

Информационный обмен между компонентами системы должен осуществляться с использованием стандартизированных протоколов обмена данными.

Проектирование должно производиться с учетом возможности восстановления и обслуживания. Система должна быть рассчитана на длительное функционирование, средний срок службы не менее 5 лет.

Размещение оборудования, технических средств должно соответствовать требованиям техники безопасности, санитарным нормам и требованиям пожарной безопасности.

Проектирование системы управления должно проводиться с использованием принципов стандартизации и унификации. Принцип стандартизации и унификации заключается в необходимости применения типовых, унифицированных и стандартизированных элементов для проектируемой системы управления.

Основные требования к электроприводу:

- управление асинхронными двигателями для изменения положения автооператоров в горизонтальном направлении с точностью позиционирования не менее 1 мм и скоростью передвижения не менее 17 м/мин;
- управление асинхронными двигателями автооператоров для изменения положения подвесок с грузом до 900 кг в вертикальном направлении со скоростью не менее 8 м/мин.

1.5 Разработка функциональной схемы

Функциональные схемы представляют собой чертежи, на которых при помощи условных изображений показывают технологическое оборудование, коммуникации, органы управления, приборы и средства автоматизации, средства вычислительной техники и другие агрегатные комплексы с указанием связей между приборами и средствами автоматизации, таблицы условных обозначений и пояснения к схеме.

Опишем подробнее функцию каждого элемента системы.

Контроль горизонтального перемещения автооператоров осуществляется посредством энкодеров. Энкодеры соединены с программируемым логическим контроллером (ПЛК) посредством промышленной сети Profibus через коммуникационный модуль, предназначенный для обмена информацией по данной сети.

Контроль вертикального перемещения подвесок автооператоров осуществляется посредством датчиков верхнего и нижнего положения. Сигналы с датчиков поступают на программируемый логический контроллер (ПЛК) через специальный модуль, предназначенный для приёма входных сигналов.

Сигналы с электромеханических выключателей, а также с кнопок пульта дистанционного управления (ПДУ) так же поступают на программируемый

логический контроллер (ПЛК) через специальный модуль, предназначенный для приёма входных сигналов.

Программируемый логический контроллер выполняет такие функции как: приём и обработка сигналов с датчиков, энкодеров и пульта дистанционного управления, обмен данными с панелью взаимодействия с оператором (HMI), а также управление преобразователями частоты для асинхронных двигателей.

Преобразователи частоты нужны для управления асинхронными двигателями, обмен данными осуществляется посредством промышленной сети Profibus. Управление системой осуществляется посредством HMI-панели (панели взаимодействия с оператором), обмен данными между ПЛК и HMI-панелью так же происходит посредством промышленной сети Profibus.

Функциональная схема, отражающая описанную выше структуру и функциональные взаимосвязи между элементами, приведена в приложении Г.

Рассмотрим подробнее элементы системы управления.

2 ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Выбор и проверка двигателя горизонтального перемещения

Принимая во внимание необходимость обеспечения высокой надежности работы тележки автооператора, как технологической единицы, на неё требуется установить асинхронный двигатель с запасом по мощности. В данный момент на ней установлен короткозамкнутый асинхронный двигатель серии АОЛ 21-4, производителя ООО «Электротехника», однако данный двигатель уже устарел и снят с производства. В связи с этим для замены был выбран двигатель с аналогичными параметрами АИР63А4 производителя ОАО «Уралэлектро». Данный двигатель оптимизирован для использования вместе с преобразователями частоты и имеет более высокий показатель защищённости от пыли и влаги.

Технические характеристики двигателя АИР63А4 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики двигателя АИР63А4 производителя ОАО «Уралэлектро»

Параметр	АОЛ 21-4	АИР63А4
Номинальный момент, M_n , Н·м	1,84	1,75
Номинальная мощность, $P_{ном}$, кВт	0,27	0,25
Номинальная частота вращения, n_n , об/мин	1400	1500
Номинальное напряжение сети, U , В	380	380
Частота питающей сети, f , Гц	50	50
Номинальный ток, I_n , А	0,83	1,16
Перегрузочная способность, λ	1,7	2,3
КПД, η	0,66	0,68
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,75	0,67
Количество пар полюсов	2	2
Динамический момент инерции, J_d , кг·м ²	0,006	0,006

Продолжение таблицы 2

Степень защиты от пыли и влаги	IP54	IP55
Производится	нет	да

На данный двигатель установлен инкрементальный энкодер EL88P производителя «Eltra». Технические характеристики энкодера приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики инкрементального энкодера EL88P

Параметр	Значение
Разрешение, дискрет/оборот	2500
Напряжение питания, В	8 – 24, постоянного тока
Максимальная скорость вращения вала, об/мин	3000
Интерфейс	NPN, открытый коллектор, LINE DRIVER
Конструктивные особенности	полый вал
Температура эксплуатации, °С	от 0 до +60
Класс защиты от пыли и влаги	IP54

Произведём проверку данного двигателя по перегрузочной способности и перегреву.

Для начала нужно рассчитать момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя тележки, он определяется по формуле:

$$M_{\Sigma ст} = W'g \frac{D_{хк}}{2\eta i} \quad (1)$$

Сопротивление от трения при движении тележки определяется по формуле:

$$W' = (G_0 + Q) \frac{(2\mu + df)}{D_{хк}} K_p, \quad (2)$$

где $G_0=402$ – вес тележки, кг;

$Q=178$ – вес груза, кг;

$\mu=0,0003$ – плечо трения качения;

$d=0,0385$ – диаметр подшипников колес, м;

$f=0,015$ – коэффициент трения в подшипниках;

$D_{\text{хк}}=0,105$ – диаметр ходового колеса, м;

$K_p=1,5$ – коэффициент, учитывающий сопротивление трения реборд ходовых колес о головку рельсов при движении тележки;

$\eta=0,76$ – коэффициент полезного действия механизма;

$i=7$ – передаточное число механизма.

$$W = (402+178) \frac{(2 \cdot 0,0003 + 0,0385 \cdot 0,015)}{0,105} 1,2 = 9,756 \text{ кг},$$

$$M_{\Sigma \text{ст}} = 9,756 \cdot 9,81 \frac{0,105}{2 \cdot 0,76 \cdot 7} = 0,945 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальная скорость выбранного двигателя рассчитывается по формуле:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}, \quad (3)$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент двигателя рассчитывается по формуле:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega}. \quad (4)$$

$$M_H = \frac{250}{157,08} = 1,592 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Выбранный двигатель АИР63А4 удовлетворяет условию по перегреву:

$$M_H > M_{\Sigma ст}, \quad (5)$$

где M_H – номинальный момент двигателя, Н·м;

$M_{\Sigma ст}$ – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя.

При проверке по перегрузочной способности двигателя необходимо выполнение условия:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} \leq \lambda_{дв}, \quad (6)$$

где M_{\max} – максимальный момент нагрузки, Н·м.

$$\lambda = \frac{0,945}{1,592} = 0,593 \leq 2,3.$$

Следовательно, двигатель проходит и по перегрузочной способности.

Двигатель тележки проверен по нагреву и перегрузочной способности, т.е. выбранный двигатель может быть использован в качестве приводного двигателя.

2.2 Выбор и проверка двигателя вертикального перемещения

Принимая во внимание необходимость обеспечения высокой надежности работы каретки автооператора, как технологической единицы, на неё требуется установить асинхронный двигатель с запасом по мощности. В данный момент на ней установлен короткозамкнутый асинхронный двигатель серии АО 41-4, с номинальной частотой вращения 1420 об/мин, номинальной мощностью 1,7 кВт и степенью защиты IP54 производителя ООО «Электротехника», однако данный двигатель уже устарел и снят с производства. В связи с этим для замены был

выбран двигатель с аналогичными параметрами АИР 90L4 производителя ОАО «Уралэлектро». Данный двигатель оптимизирован для использования вместе с преобразователями частоты и имеет более высокий показатель защищённости от пыли и влаги.

Технические характеристики двигателя АИР 90L4 приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики двигателя АИР 90L4 производителя ОАО «Уралэлектро»

Параметр	Значение
Номинальный момент, M_n , Н·м	14,8
Номинальная мощность, $P_{ном}$, кВт	2,2
Номинальная частота вращения, n_n , об/мин	1420
Номинальное напряжение сети, U, В	380
Частота питающей сети, f, Гц	50
Номинальный ток, I_n , А	5,4
Перегрузочная способность, λ	2,0
КПД, η	0,797
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,79
Количество пар полюсов	2
Динамический момент инерции, J_d , кг·м ²	0,0060
Степень защиты от пыли и влаги	IP55

На данный двигатель установлен инкрементальный энкодер EL88P производителя «Eltra». Технические характеристики энкодера были приведены в таблице 3.

Произведём проверку данного двигателя по перегрузочной способности и перегреву.

Для начала нужно рассчитать момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя каретки, он определяется по формуле:

$$M_{\Sigma ст} = \frac{mgD_6}{2\eta i}. \quad (7)$$

где $m=178$ – масса груза, кг;

$g=9,81$ – ускорение свободного падения;

$D_6=0,250$ – диаметр барабана, м;

$\eta=0,76$ – коэффициент полезного действия механизма;

$i=36$ – передаточное число механизма.

$$M_{\Sigma ст} = \frac{178 \cdot 9,81 \cdot 0,250}{2 \cdot 0,76 \cdot 36} = 7,978 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальная скорость выбранного двигателя равна:

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1420}{30} = 148,63 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент двигателя равен:

$$M_n = \frac{2200}{148,63} = 14,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Выбранный двигатель АИР 90L4 удовлетворяет условию по перегреву:

$$M_n > M_{\Sigma ст}, \quad (8)$$

где M_n – номинальный момент двигателя, Н·м;

$M_{\Sigma ст}$ – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя.

Проверим перегрузочную способность двигателя:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} \leq \lambda_{\text{дв}}, \quad (9)$$

где M_{\max} – максимальный момент нагрузки, Н·м.

$$\lambda = \frac{7,978}{14,8} = 0,539 \leq 2,0.$$

Следовательно, двигатель проходит и по перегрузочной способности.

Двигатель тележки проверен по нагреву и перегрузочной способности, т.е. выбранный двигатель может быть использован в качестве приводного двигателя.

2.3 Проверка и выбор силового оборудования автооператоров

Расчет и выбор преобразователя частоты зависит от номинального тока двигателя и от его перегрузочной способности.

Ток преобразователя частоты определяется по формуле:

$$I_{\text{пч}} = \frac{\lambda_{\text{дв}}}{\lambda_{\text{пч}}} I_{\text{дв.н}}, \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{дв}}$ – перегрузочная способность двигателя;

$\lambda_{\text{пч}}$ – перегрузочная преобразователя частоты.

$$I_{\text{пч}} = \frac{2,3}{1,5} 1,16 = 1,78 \text{ А.}$$

По полученному значению тока преобразователя частоты выбирается преобразователь частоты, чей номинальный ток удовлетворяет условию:

$$I_n > I_{\text{расч}} \quad (11)$$

Для управления асинхронным двигателем привода горизонтального перемещения выбран преобразователь частоты Unidrive M400-024 00032A, технические данные которого приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические данные преобразователя частоты Unidrive M400-024 00032A

Параметр	Значение
Номинальная мощность, $P_{\text{ном}}$, кВт	1,1
Номинальное напряжение сети, U, В	380
Частота питающей сети, f, Гц	50
Номинальный ток, I_n , А	3,2
Перегрузочная способность, λ	1,5
КПД, η , %	0,98

Для управления асинхронным двигателем привода вертикального перемещения выбран преобразователь частоты Unidrive M400-024 00094A, технические данные которого приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические данные преобразователя частоты Unidrive M400-024 00094A

Параметр	Значение
Номинальная мощность, $P_{\text{ном}}$, кВт	4
Номинальное напряжение сети, U, В	380
Частота питающей сети, f, Гц	50

Продолжение таблицы 6

Номинальный ток, I_n , А	9,4
Перегрузочная способность, λ	1,5
КПД, η , %	0,98

Особенности линейки преобразователей частоты Unidrive M400:

- Опциональный порт RS485 и дополнительные SI-модули для передачи данных по шине fieldbus.
- Входы-выходы можно конфигурировать для работы с энкодером или для отслеживания частоты.
- Один из самых компактных приводов в своем классе для каждого номинала мощности.
- Низкие потери, КПД до 98% и режим ожидания с низким энергопотреблением.

Типовые применения – регулирование скорости для конвейеров, нагнетательных поршневых насосов, транспортировки материала, резки, обработки древесины.

Исходя из номинального тока выбранного преобразователя частоты, выбирается входной линейный реактор RWK 212-11-KL фирмы Schaffner, так как его номинальный ток больше номинального тока преобразователя частоты. Технические данные токоограничивающего реактора приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические данные линейного реактора типа RWK 212-11-KL

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, U, В	400
Частота питающей сети, f, Гц	50
Номинальный ток, I_n , А	11
Номинальная индуктивность, L_n , мГн	2,6

Для преобразователей частоты Unidrive M400-024 00032A и Unidrive M400-024 00094A были выбраны ЭМС-фильтры 4200-6118 производителя Schaffner, и электромагниты тормоза МИС 1100, 380 В, 50 Гц с номинальным тяговым усилием 15 Н, производитель ООО «Электромагнит».

Электромагнит тормоза предназначен для управления механическими тормозами. В свою очередь эти тормоза служат для остановки крановых механизмов в заданном положении или ограничения пути торможения в случае выбега при отключении приводного электродвигателя.

2.4 Проверка и выбор элементов защиты автооператоров

Для защиты аппаратуры от воздействия сверхтоков и от токов перегрузки был выбран автомат с электронным максимальным расцепителем, чей номинальный ток удовлетворяет условию:

$$I_n > I_{\text{расч}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{расч}}=9,4 \cdot 2 + 11 \cdot 2 = 40,8$ А – расчетный ток двух автооператоров, который равен номинальному току всех преобразователей частоты.

Выбран и установлен автомат типа VL 160 с электронным максимальным расцепителем ETU 10m (3VL27 06-1AP33-0AA0), производитель Siemens. Технические данные приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические данные автомата с электронным максимальным расцепителем

Параметр	Значение
Номинальный ток, I_n , А	63
Ток настройки токозависимых расцепителей перегрузки с выдержкой времени, I_m , А	26-63

Также для каждого привода горизонтального и вертикального перемещения были выбраны автоматические разъединители SENTRON с контролем быстродействующих предохранителей SITOR с номинальным током $I_n=16$ А производителя Siemens, а также модуль защиты трехфазных приборов от перенапряжений MAINS-MODUTRAB MT-4PE-230 AC производителя Phoenix Contact.

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Выбор энкодера привода горизонтального перемещения автооператора

Энкодер - это устройство для преобразования угловых или линейных перемещений в аналоговый или цифровой сигнал. Энкодеры подразделяются на инкрементальные и абсолютные.

Инкрементальный энкодер выдает определенное количество импульсов при перемещении в определённом направлении. Абсолютные энкодеры позволяют в любой момент времени знать текущее положение, в том числе и после пропадания и восстановления питания.

Энкодеры могут быть оптическими, резисторными или магнитными и могут работать через шинные интерфейсы или промышленную сеть.

При включении устройства возникнет необходимость нахождения нулевого положения автооператоров для точного определения их положения в дальнейшем. Проблема определения нулевого положения полностью решается при применении абсолютного энкодера.

Был проведён анализ присутствующих на данный момент на отечественном рынке абсолютных энкодеров с тросовым барабаном различных производителей и составлена сводная таблица из наиболее близких по основным параметрам энкодеров.

Для сравнения были выбраны:

- абсолютный энкодер HighLine BTF13-P1HM1025 фирмы SICK;
- абсолютный энкодер SL 3020 фирмы TR-Electronic.

Основные технические характеристики выбранных для сравнения абсолютных энкодеров с тросовыми барабанами приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики выбранных для сравнения абсолютных энкодеров с тросовыми барабанами

Параметр	BTF13-P1HM1025	SL 3020
Длина измерения, мм	0 – 20 000	0 – 20 000
Разрешение (трос + энкодер), мм	0,04	0,1
Протоколы обмена	Profibus	Profibus
Напряжение питания, В	10 – 32	10 – 32
Потребляемая мощность, Вт	2	2
Максимальная скорость передачи, Мб/с	12	12
Вес (энкодер + механизм), кг	4,09	6,3
Материал измерительного троса	Алюминий (анодированный), пластик	Алюминий (анодированный), нержавеющая сталь
Усилие возвратной пружины, Н	10 – 20	7,5 – 15
Срок службы тросового механизма, циклов	10 ⁶	10 ⁶
Диаметр измерительного троса, мм	0,81	0,81
Класс защиты от пыли и влаги	IP67	IP65
Диапазон рабочих температур (энкодер), °С	от -20 до +70	от -20 до +70
Диапазон рабочих температур (механизм), °С	от -30 до +70	от -30 до +85

Исходя из сводной таблицы 9 видно, что наиболее подходящим по параметрам абсолютным энкодером с тросовым барабаном является энкодер HighLine BTF13-P1HM1025 фирмы SICK.

3.2 Выбор датчиков верхнего и нижнего положения подвески автооператора

В качестве датчиков верхнего и нижнего положения подвесок автооператоров выбраны индуктивные датчики BES 517-132-M5-H фирмы Balluff серии Unisensor с расстоянием срабатывания 30 мм и предназначенный для бесконтактного определения конечного положения металлических объектов. Особенностью датчиков данной серии является возможность поворота чувствительной головки в нескольких направлениях, что облегчает настройку положения датчиков на конструкции.

Технические характеристики индуктивных датчиков BES 517-132-M5-H приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики индуктивных датчиков BES 517-132-M5-H фирмы Balluff

Параметр	Значение
Расстояние срабатывания, мм	15 – 30
Тип корпуса	прямоугольный
Входной сигнал	PNP NO , PNP NC , PNP NO+NC
Напряжение питания, В	10 – 55
Подключение	клеммы
Частота переключений, Гц	60
Диапазон рабочих температур, °С	от -25 °С до +70
Габариты датчика, мм	120x40x40

3.3 Выбор электромеханических выключателей

В качестве электромеханических выключателей выбраны механические датчики BNS 813-100-D-49-FC фирмы Balluff с принудительным размыканием. Технические характеристики датчиков приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики электромеханических выключателей BNS 813-100-D-49-FC фирмы Balluff

Параметр	Значение
Тип конструкции	механический датчик положения
Расстояние до толкателя	11 мм
Диаметр толкателя	6 мм
Форма толкателя	крыша
Функция переключения, механическая	одноконтактный переключатель с принудительным размыканием
Количество точек переключения	1
Усилие переключения	8 Н
Покрытие корпуса	элоксаль
Степень защиты	IP67
Подключение	винтовой разъём
Длительный ток	5 А
Расчётное рабочее напряжение	24 В
Частота переключений	макс. 200/мин
Диапазон рабочих температур	от -5 °С до +85 °С
Габариты датчика	49x22x42 мм

3.4 Выбор программируемого логического контроллера и периферии

В качестве ПЛК был выбран CPU S7-315-2 PN/DP. Для взаимодействия с оператором выбрана панель оператора HMI KTP 1200 Basic DP.

Для ПЛК выбраны следующие модули:

- Модуль дискретных входов SM 321 DI 16x24 VDC (2 шт.).
- Модуль дискретных выходов SM 322 DO 16x24 VDC/0.5A (1 шт.).
- Коммуникационный модуль (процессор) CP 343-1.
- Интеллектуальный модуль позиционирования FM 354.

Также для последующей модернизации механизмов загрузки/выгрузки муфт предусмотрены дополнительные модули:

- Модуль дискретных входов SM 321 DI 16x24 VDC (2 шт.).
- Модуль дискретных выходов SM 322 DO 16x24 VDC/0.5A (1 шт.).

В качестве подвесного пульта выбран пульт ХАС 4713, имеющий 4 кнопки для управления положением автооператора («Вверх», «Вниз», «Влево», «Вправо») и кнопку перевода в ручное управление, срабатывающую при наличии ключ-бирки.

Рассмотрим подробнее все выбранные устройства.

CPU 315-2 PN/DP – центральный процессор со встроенными интерфейсами MPI/DP и PROFINET, предназначенный для использования в модульных системах Component Based Automation и системах распределенного ввода-вывода на основе Industrial Ethernet.

CPU 315-2 PN/DP характеризуется следующими показателями:

- Микропроцессор: 100 нс на выполнение бинарной инструкции, 3 мкс на выполнение арифметической операции с плавающей точкой.
- Рабочая память объемом 256 Кбайт, RAM (приблизительно 86 тысяч инструкций) для выполнения загруженной секции программы и хранения оперативных данных. Микро-карта памяти (до 8 Мбайт), используемая в качестве загружаемой памяти, а также сохранения архива проекта (с комментариями и таблицей символов), архивирования данных и управления рецептами.
- Гибкие возможности расширения: подключение до 32 модулей S7-300 (4-рядная конфигурация).
- Комбинированный интерфейс MPI/PROFIBUS DP. Позволяет устанавливать одновременно до 16 соединений с программируемыми контроллерами S7-300/400, программаторами, компьютерами и панелями операторов. Одно из этих соединений зарезервировано для PG-, одно – для OP функций связи [2].

MPI позволяет создавать простейшие сетевые структуры с объединением до 32 центральных процессоров и поддержкой механизма передачи глобальных данных.

Интерфейс MPI может быть реконфигурирован на работу в режиме ведущего или ведомого устройства PROFIBUS DP [2].

Интерфейс PROFIBUS DP обеспечивает поддержку стандарта PROFIBUS DP. Это позволяет существенно расширять спектр используемых ведомых устройств DP, обеспечивать полноценную поддержку их диагностических функций и функций дистанционной настройки параметров.

Вторым встроенным интерфейсом центрального процессора CPU 315-2 PN/DP является интерфейс PROFINET, базирующийся на функциональных возможностях Ethernet TCP/IP.

Основные технические характеристики программируемого логического контроллера CPU 315-2 PN/DP приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Технические характеристики CPU 315-2 PN/DP

Номинальное входное напряжение, В	24
Потребляемый ток без нагрузки, мА	100
Датчики	2-, 3- и 4-проводные схемы подключения контактных или бесконтактных датчиков
Программируемые диагностические функции	нет
Рабочая память, встроенная, Кб	256
Расширение рабочей памяти	нет
Минимальное время выполнения операций с битами, мкс	0,1
Минимальное время выполнения операций со словами, мкс	0,2

Продолжение таблицы 12

Минимальное время выполнения операций целочисленной математики, мкс	2
Минимальное время выполнения математических операций с плавающей точкой, мкс	3

Модули дискретных входов SM 321 DI 16x24 VDC (модуль ввода дискретных сигналов) предназначены для преобразования входных дискретных сигналов контроллера в его внутренние логические сигналы. К входам модулей могут подключаться контактные датчики или бесконтактные датчики BERO. Модули SM 321 могут работать в системах локального ввода-вывода всех модификаций программируемых контроллеров S7-300, а также в станциях распределенного ввода-вывода ET 200M. Модули выпускаются в пластиковых корпусах. На их лицевых панелях расположены:

- зеленые светодиоды, индицирующие состояние входных цепей;
- красный светодиод индикации отказов и ошибок;
- разъем для установки фронтального соединителя, закрытый защитной крышкой;
- паз на защитной крышке для установки этикетки с маркировкой внешних цепей [3].

Основные технические характеристики модуля дискретных входов SM 321 DI 16x24 VDC приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Технические характеристики модуля дискретных входов SM 321 DI 16x24 VDC

Параметр	Значение
Номинальное входное напряжение, В	24, постоянного тока
Количество входов, которыми можно управлять одновременно	16

Продолжение таблицы 13

Гальваническая развязка между каналами и задней шиной	да
Допустимая разность потенциалов между различными цепями тока	75 В, постоянного тока; 60 В, переменного тока.
Индикация состояния	Зеленый светодиод на каждом канале
Входное запаздывание, мс	от 1,2 до 4,8

Модули дискретных выходов SM 322 DO 16x24 VDC/0.5 (модуль вывода дискретных сигналов) предназначены для преобразования внутренних логических сигналов контроллера в его выходные дискретные сигналы. К выходам модулей могут подключаться исполнительные устройства или их коммутационные аппараты.

Модули SM 322 могут работать в системах локального ввода-вывода всех модификаций программируемых контроллеров S7-300, а также в станциях распределенного ввода-вывода ET 200M.

Модули выпускаются в пластиковых корпусах. На их лицевых панелях расположены:

- зеленые светодиоды, индицирующие состояние выходных цепей;
- красный светодиод индикации отказов и ошибок;
- разъем для установки фронтального соединителя, закрытый защитной крышкой;
- паз на защитной крышке для установки этикетки с маркировкой внешних цепей [3].

Цифровой модуль вывода SM 322; DO 16x24 VDC/0.5 А отличается следующими свойствами:

- 16 выходов, потенциальная развязка группами по 8;
- выходной ток 0,5 А;

- номинальное напряжение на нагрузке 24 В постоянного тока;
- пригоден для электромагнитных клапанов, контакторов постоянного тока и сигнальных ламп [3].

Основные технические характеристики модуля дискретных входов SM 322 DO 16x24 VDC/0.5 приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики модуля дискретных входов SM 322 DO 16x24 VDC/0.5

Параметр	Значение
Номинальное напряжение на нагрузке L+, В	24, постоянного тока
Количество выходов	16
Потребление тока, мА	80
Гальваническая развязка между каналами и задней шиной	да
Допустимая разность потенциалов между различными цепями тока	75 В, постоянного тока; 60 В, переменного тока.
Индикация состояния	Зеленый светодиод на каждом канале
Входное запаздывание (для омической нагрузки) с «0» на «1, мкс», не более	100
Входное запаздывание (для омической нагрузки) с «1» на «0», мкс, не более	500
Диапазон сопротивления нагрузки, Ом	от 48 до 4000
Ламповая нагрузка, Вт, не более	5
Защита выхода от короткого замыкания	есть, электронная

Коммуникационный модуль (процессор) CP 343-1 предназначен для разгрузки центрального процессора от обслуживания коммуникационных задач при обработке информации с абсолютных энкодеров, управлении частотными

преобразователями и обмене информацией с панелью оператора, посредством промышленной сети Profibus.

Основные технические характеристики коммуникационного модуля CP 343-1 приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Технические характеристики коммуникационного модуля CP 343-1

Напряжение питания от внутренней шины контроллера, В	24±5%, постоянного тока
Напряжение питания от внешнего блока питания, В	5±5%, постоянного тока
Потребляемый ток от внутренней шины контроллера, мА	200
Потребляемый ток от источника питания 24В, не более, мА	200
Потребляемая мощность, Вт	6
Скорость передачи данных, Мбит/с	10/100
Автоматическое определение скорости передачи	поддерживается
Количество одновременно обслуживаемых соединений, не более	12

Интеллектуальный модуль FM 354 предназначен для решения задач позиционирования и позволяет управлять электроприводами с серводвигателями. Он может быть использован для комплексного решения задач с жесткими требованиями по точности и скорости позиционирования в машинах с высокой частотой следования импульсов управления. Может быть использован в качестве ПИД-регулятора.

Управляющие воздействия формируются в виде аналоговых сигналов, подаваемых на силовую секцию. В качестве силовой секции может использоваться преобразователь частоты. Текущие координаты контролируются с

помощью инкрементального датчика положения или датчика абсолютного перемещения.

Модуль может работать в системах локального ввода-вывода программируемых контроллеров S7-300, а также в станциях систем распределенного ввода-вывода ET 200M. [2]

Помимо модуля FM 354 система позиционирования включает в свой состав центральный процессор контроллера S7-300, силовую секцию, программатор и, при необходимости, панель оператора. [2]

В такой системе задачи позиционирования распределяются следующим образом:

- Модуль FM 354: позиционирование с управлением серводвигателем.
- Преобразователь частоты (силовая секция: управление двигателем.
- Центральный процессор S7-300: управление последовательностью действий, пуск и остановка позиционирования.
- Программатор: разработка программ STEP 7, настройка параметров модуля FM 354, тестирование и отладка программы.
- Панель оператора: создание человеко-машинного интерфейса, диагностирование отказов и ошибок. [2]

Для модуля FM 354 могут быть выполнены следующие подготовительные шаги:

- Согласование параметров модуля с параметрами шагового двигателя: эта операция выполняется вводом технических данных двигателя в программное обеспечение конфигурирования, которое входит в комплект поставки модуля.
- Определение траектории движения:
 - Для простого перемещения от точки к точке: определить конечную точку позиционирования и скорость перемещения. Данные записываются в память центрального процессора.

- Для более сложных задач: задать программу перемещения. Параметры модуля могут программироваться в форме, соответствующей требованиям DIN 66025. Допускается программирование в режиме обучения. [2]

Управляющие воздействия формируются в виде аналоговых сигналов $\pm 10V$ (контакты SW-BS соединителя X2). Текущие координаты контролируются с помощью инкрементального или синхронно-последовательного (SSI) датчика позиционирования.

Модуль FM 354 поддерживает следующие функции позиционирования:

- Установка: начало перемещения по сигналу от кнопки.
- Пошаговый режим: перемещение по маршруту, заданному в табличной форме.
- Ручное управление: позиционирование в любой точке, перемещение с любой допустимой скоростью.
- Автоматическое выполнение одного или нескольких блоков управления: для выполнения комплексных задач позиционирования с непрерывной или периодической подачей, реверсом и возвратом и т.д.
- Специальные функции:
 - Измерение пройденного пути.
 - Запуск и остановка операций позиционирования через скоростной вход модуля FM 354.
 - Установка ограничений.
 - Установка текущих значений «на лету» [2].

Основные технические характеристики интеллектуального модуля FM 354 приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Технические характеристики интеллектуального модуля FM 354

Напряжение питания, В	24 \pm 15%, пост. тока
Потребляемый ток от источника питания 24В, мА, не более	350

Продолжение таблицы 16

Потребляемый ток от внутренней шины контроллера, мА, не более	100
Потребляемая мощность, Вт	8
Типы подключаемых датчиков	Инкрементальные датчики с симметричными сигналами (RS422); инкрементальные датчики с ассиметричными сигналами; синхронно-последовательные (SSI) датчики абсолютного перемещения.
Дискретные входы	
Количество	4
Функции	Фиксация прохождения контрольной точки, установка значений «на лету», пуск и остановка, замена внешнего блока
Оптическая изоляция	нет
Входное напряжение, номинальное значение, В	24, постоянного тока
Входное напряжение сигнала низкого уровня, В	-3...+5
Входное напряжение сигнала высокого уровня, В	11...30
Входной ток сигнала низкого уровня, мА	2
Входной ток сигнала высокого уровня, мА	6...15

Продолжение таблицы 16

Дискретные выходы	
Количество	4
Функции	Достижение конечных положений, реверс, разрешение пуска, прямой вывод через запись данных
Оптическая изоляция	нет
Выходное напряжение, номинальное значение, В	24, постоянного тока
Выходное напряжение сигнала низкого уровня	$U_{L+} - 3В$
Входной ток сигнала низкого уровня, мА, не более	2
Входной ток сигнала высокого уровня при U_{L+max} и температуре до $+55^{\circ}C$, А, не более	0,6

Исходя из выбранного оборудования, в программном пакете Eplan Electric была спроектирована электрическая схема системы управления. Схема электрическая привода перемещения приведена в приложении Д.

3.5 Построение системы автоматического регулирования

Современные системы управления электроприводов строятся, в основном, по принципу подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией.

Передаточные функции замкнутых контуров регулирования таких систем оптимальны с точки зрения обеспечения минимальной интегральной квадратичной ошибки регулирования по задающему воздействию и являются передаточными функциями фильтров Баттерворса соответствующих порядков.

Настройка этих систем соответствует настройке на модульный (технический) оптимум. При этом получаются оптимальные переходные процессы, обеспечивающие максимальное быстродействие при минимальном перерегулировании. Передаточная функция регулятора i -го контура регулирования при настройке на модульный оптимум определяется по формуле:

$$W_{pi}(p) = \frac{1}{2^i T_{\mu p}} \frac{1}{W_{oi}(p)} \frac{K_{oi-1}}{K_{oi}}, \quad (25)$$

где T_{μ} – некомпенсируемая малая постоянная времени преобразователя частоты;

$W_{oi}(p)$ – передаточная функция объекта регулирования i -го контура (звена, подлежащего компенсации настройкой регулятора);

K_{oi-1} , K_{oi} – коэффициенты обратных связей предыдущего и рассматриваемого контуров [4].

В случае, когда под воздействием момента нагрузки основные показатели качества регулирования электропривода (статическая просадка скорости или статическая ошибка регулирования по положению) не удовлетворяют поставленным требованиям, применяют астатические системы регулирования, построенные по симметричному оптимуму или отвечающие «минимальному показателю колебательности» [4].

3.5.1 Определение коэффициентов цепей обратных связей

Следующим шагом является определение коэффициентов обратных связей. Данные коэффициенты должны обеспечить работу элементов системы автоматического регулирования в рабочем диапазоне ± 10 В. В общем виде коэффициент обратной связи K_{oi} для i -го параметра X_i может быть рассчитан по формуле:

$$K_{oi} = \frac{10 \text{ В}}{X_i} \quad (13)$$

В соответствии с данной формулой определим коэффициент обратной связи по моменту:

$$K_{\text{ом}} = \frac{10}{M_{\text{н}}} = \frac{10}{1,75} = 5,71 \frac{\text{В}}{\text{Н}\cdot\text{м}},$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент двигателя, Н·м.

В соответствии с формулой (13) определим коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{\text{ос}} = \frac{10}{\omega_{\text{н}}} = \frac{10}{157,08} = 0,064 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}},$$

где $\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Так же в соответствии с данной формулой определим коэффициент обратной связи по перемещению:

$$K_{\text{оп}} = \frac{10}{S_{\text{н}}} = \frac{10}{10} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

где $S_{\text{н}}$ – расстояние, на которое может передвигаться автооператор, м.

3.5.2 Определение параметров механического звена электропривода

Теперь необходимо определиться со значениями параметров механического звена электропривода, который реализует преобразование электрической энергии в механическую. Расчет механического звена следует начать с определения значения суммарного момента инерции, приведенного к валу электропривода:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{к}} + J_{\text{авт.г}} \quad (14)$$

где $J_{дв} = 0,006 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – динамический момент инерции двигателя (справочная величина);

$J_p = 0,011 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – динамический момент инерции редуктора (справочная величина);

J_k – динамический момент инерции колеса тележки автооператора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

$J_{авт.г}$ – динамический момент инерции при поступательном движении автооператора с грузом, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

Динамический момент инерции колеса тележки автооператора вычисляется по формуле:

$$J_k = \frac{mr^2}{2 \cdot i} \quad (15)$$

где $m = 2,55$ – масса колеса, кг;

$r = 0,105$ – радиус колеса, м;

$i = 7$ – передаточное число редуктора.

$$J_k = \frac{2,55 \cdot 0,105^2}{2 \cdot 7} = 0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Динамический момент инерции при поступательном движении автооператора с грузом вычисляется по формуле:

$$J_{авт.г} = (m_{авт} + m_{г}) \left(\frac{V}{\omega_H} \right)^2, \quad (16)$$

где $m_{авт} = 402,5$ – масса автооператора, кг;

$m_{г} = 178$ – максимальная масса груза, перевозимого автооператором, кг;

$V = 0,28$ – максимальная скорость перемещения автооператора, м/с;

$\omega_H = 157,08$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

$$J_{\text{авт.г}} = (402,5+178) \left(\frac{0,28}{157,08} \right)^2 = 0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Суммарный момент инерции, приведенный к валу электропривода при наличии груза:

$$J_{\Sigma} = 0,006+0,011+0,002+0,002=0,021 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Динамический момент инерции при поступательном движении автооператора без груза вычисляется по формуле:

$$J_{\text{авт.б}} = m_{\text{авт}} \left(\frac{V}{\omega_H} \right)^2, \quad (17)$$

$$J_{\text{авт.б}} = 402,5 \left(\frac{0,28}{157,08} \right)^2 = 0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Суммарный момент инерции, приведенный к валу электропривода при отсутствии груза:

$$J_{\Sigma} = 0,006+0,011+0,002+0,002=0,021 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Из результатов расчёта момента инерции, приведённого к валу электропривода при наличии груза и момента инерции, приведённого к валу электропривода при отсутствии груза видно, что момент инерции практически не меняется.

3.5.3 Определение звена электродвигателя

Для систем подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, имеющих передаточные функции фильтров Баттерворса, при построении систем управления электроприводом и их теоретическом анализе внутренние контуры регулирования можно рассматривать в упрощенном виде. При этом передаточные функции внутренних контуров регулирования аппроксимируются апериодическим звеном соответствующего быстродействия в соответствии с выражением:

$$W_{i-1}(p) = \frac{1/K_{oi}}{2^{i-1}T_{\mu}p+1}, \quad (18)$$

где $(i-1)$ – номер рассматриваемого внутреннего контура регулирования, где $i \geq 2$. Тогда внешний контур представляется оптимальным звеном второго порядка соответствующего быстродействия [4].

В частности, при рассмотрении контура регулирования скорости ($i=2$), передаточная функция замкнутого контура регулирования тока упрощается:

$$W_{т.з}(p) \cong \frac{1/K_{от}}{2T_{\mu}p+1}. \quad (19)$$

3.5.4 Построение контура регулирования скорости

В теории автоматического управления для замкнутых контуров с передаточной функцией существует множество различных критериев для оптимизации посредством настройки регулятора с последовательным его включением с объектом управления.

Для электроприводов широкое распространение получил динамический оптимум, так называемый *Betragsiptimum* – модульный оптимум, означающий,

что замкнутый контур динамически оптимален, если он одинаково передает на выход разночастотные входные сигналы на возможно большем интервале частот, то есть на данном интервале модуль АЧХ замкнутого контура постоянен.

Данная настройка может быть применена для систем второго порядка. Также, данную настройку называют настройкой на технический оптимум. При техническом оптимуме может быть обеспечен переходный процесс, близкий к оптимальному, при котором достигается небольшое перерегулирование и относительно высокое время регулирования.

Настройка как правило используется для многоконтурных систем управления с подчиненным регулированием, в которых один регулятор вырабатывает задающие воздействия для второго регулятора, находящегося во внутреннем контуре первого. Каждый контур должен быть настроен индивидуально, а их параметры могут быть определены при оптимизации каждого из них.

Смысл термина настройки на оптимум по модулю в том, что при этом стремятся в широкой полосе частот сделать модуль частотной характеристики замкнутого контура близким к единице [5].

Переходный процесс в системе при ступенчатом управляющем воздействии показан на рисунке 4.

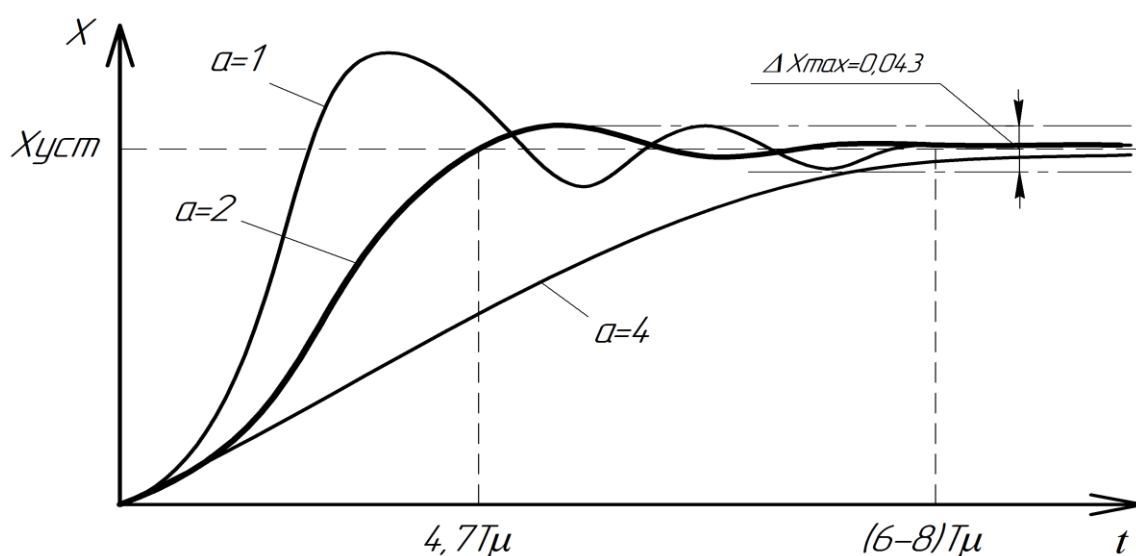


Рисунок 4 – Переходный процесс в системе при ступенчатом управляющем воздействии при разных соотношениях постоянных a .

Выходная величина в случае $a = 2$ достигает установившегося значения через время $t = 4,7T_{\mu}$, перерегулирование составляет 4,3 %, она выделена утолщенной линией. Это значение соотношения постоянных контура регулирования обеспечивает минимальное время регулирования. Так как влияние постоянной времени объекта скомпенсировано коррекцией, длительность переходного процесса от нее не зависит, а определяется только малой постоянной времени T_{μ} [5].

При настройке всех контуров регулирования на технический оптимум ($a=2$) передаточную функцию i -го разомкнутого контура можно записать так:

$$W_{\text{раз}}^i(p) = \frac{1}{2^i T_{\mu} p (2^{i-1} T_{\mu} p + 1)}. \quad (20)$$

То же для замкнутого контура:

$$W_{\text{зам}}^i(p) = \frac{1}{2^i T_{\mu} p (2^{i-1} T_{\mu} p + 1) + 1}. \quad (21)$$

Частота среза контура скорости при этом будет равна:

$$\omega_{\text{сз}} = \frac{1}{4T_{\mu}}. \quad (22)$$

Контур скорости является вторым контуром, поэтому $i=2$, следовательно, исходя из формулы (20), передаточная функция примет вид:

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{1}{4T_{\mu} p (2T_{\mu} p + 1)}. \quad (23)$$

Теперь можно рассчитать значение коэффициента передачи регулятора скорости K_{pc} , зная что:

$$W_{раз}(p) \cdot W_{pc.раз}(p) = 1, \quad (24)$$

$$W_{pc.раз}(p) = W_{дв}(p) \cdot W_{им}(p) \cdot K_{oc} K_{pc}, \quad (25)$$

где $W_{pc.раз}(p)$ – передаточная функция разомкнутого контура скорости.

Тогда коэффициент передачи регулятора скорости можно вычислить как:

$$K_{pc} = \frac{1}{W_{дв}(p) \cdot W_{им}(p) \cdot K_{oc}} = \frac{1}{4T_{\mu p} (2T_{\mu p+1})} \cdot \frac{(2T_{\mu p+1})J_{\Sigma p}}{K_{oc} \cdot 1/K_{ом}}. \quad (26)$$

Упростив формулу (26) получим:

$$K_{pc} = \frac{J_{\Sigma} K_{ом}}{4T_{\mu} K_{oc}}. \quad (27)$$

$$K_{pc} = \frac{J_{\Sigma} K_{ом}}{4T_{\mu} K_{oc}} = \frac{0,021 \cdot 5,71}{4 \cdot 0,002 \cdot 0,064} = 235,62 \text{ с}^2/\text{рад}.$$

3.5.5 Построение контура регулирования положения

Для настройки контура регулирования положения необходимо обеспечить:

- необходимую точность регулирования;
- максимальное быстродействие.

Также, при отработке заданных перемещений не должно присутствовать перерегулирование.

При отработке заданного перемещения система может работать в трёх режимах:

- отработка малых перемещений, когда характеристика является линейной, а регулируемые координаты ещё не достигают установившегося значения;
- отработка средних перемещений, когда якорный ток достигает установившегося значения и система работает с заданным ускорением;
- отработка больших перемещений, когда ток и скорость вращения электропривода достигают установившегося значения. Регулятор перемещения в данном случае находится в ограничении.

3.5.5.1 Построение регулятора положения при отработке малых перемещений

Если передаточную функцию регулятора перемещения выбрать в соответствии с настройкой на модульный оптимум, то в этом случае получается пропорциональный регулятор положения с частотой среза контура положения в два раза меньшей частоты среза контура регулирования скорости [4]:

$$W(p) = \frac{K_{oc}i}{8T_{\mu}K_{оп}K_{м}} = K_{рп}, \quad (28)$$

$$\omega_{сп} = \frac{\omega_{сc}}{2} = \frac{1}{8T_{\mu}}. \quad (29)$$

При этом обеспечивается оптимальный переходный процесс системы третьего порядка, имеющий перерегулирование, что является недопустимым для позиционных СУЭП [4].

При расчёте регулятора положения для устранения перерегулирования по положению при малых перемещениях можно снизить время регулирования контура регулирования по положению.

Частота среза контура положения при этом может быть выбрана из соотношения:

$$\omega_{сп} = \frac{\omega_{сс}}{3 \div 4} = \frac{1}{(12 \div 16)T_{\mu}} \quad (30)$$

Тогда, для данного случая, коэффициент передачи регулятора положения, который будет обеспечивать работу данного контура при отработке малых перемещений с отсутствием перерегулирования, $K_{рпм}$ может быть рассчитан по формуле:

$$K_{рпм} = \frac{\omega_{сп}K_{ос}}{K_{оп}K_i} = \frac{K_{ос}}{(12 \div 16)T_{\mu}K_{оп}K_i} \quad (31)$$

где K_i – коэффициент передачи механизма.

Коэффициент передачи механизма можно вычислить по формуле:

$$K_i = \frac{r}{i} \quad (32)$$

где $r=0,105$ – радиус ведущего колеса тележки, м;

$i=7$ – передаточное число редуктора.

$$K_i = \frac{r}{i} = \frac{0,105}{7} = 0,015.$$

Вычислим коэффициент передачи регулятора положения, который обеспечивает работу данного контура при отработке малых перемещений с отсутствием перерегулирования:

$$K_{рпм} = \frac{K_{ос}}{16T_{\mu}K_{оп}K_i} = \frac{0,064}{16 \cdot 0,002 \cdot 1 \cdot 0,015} = 132,63.$$

Отклонение значения от расчетного может привести к возникновению перерегулирования или к появлению режима «дотягивания», что впоследствии может увеличить время на отработку заданного перемещения. Рассчитанный коэффициент регулятора положения в режиме малых перемещений может быть скорректирован при моделировании системы управления электроприводом, при этом следует добиваться работы системы без перерегулирования при максимально возможном быстродействии.

3.5.5.2 Построение регулятора положения при отработке больших перемещений

При отработке регулятором положения больших перемещений, тахограмма электропривода имеет вид трапеции, скорость при этом достигает установившегося значения. При данном условии регулятор положения заходит в ограничение, по этой причине выходной сигнал регулятора должен быть ограничен на уровне максимального задания скорости ($U_{\text{вых.рп}} = K_{\text{ос}} \cdot \omega_{\text{н}}$).

При отработке регулятором положения больших перемещений должно быть обеспечено оптимальное торможение со скорости $\omega_{\text{н}}$ за минимальное время с постоянным ускорением (замедлением) ε_{max} . Исходя из этого коэффициент передачи регулятора положения при отработке больших перемещений может быть рассчитан по следующей формуле [4]:

$$K_{\text{рпб}} = \frac{2K_{\text{ос}}}{K_1 K_{\text{оп}}} \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (33)$$

$$K_{\text{рпб}} = \frac{2 \cdot 0,064}{7 \cdot 1} \cdot \frac{46,67}{157,08} = 2,522 .$$

При отклонении значения коэффициента передачи регулятора положения от расчетного в меньшую сторону может возникнуть режим «дотягивания», при

котором оставшийся путь система будет обрабатывать с некоторым ускорением или замедлением, меньше заданного. При отклонении значения коэффициента передачи регулятора положения от расчетного в большую сторону при обработке заданного перемещения может возникнуть перерегулирование.

3.5.5.3 Построение регулятора положения при обработке средних перемещений

При обработке регулятором положения средних перемещений тахограмма электропривода имеет треугольный вид. В данном случае необходимо обеспечить одинаковое ускорение и замедление электропривода.

Выбор момента начала торможения и обеспечение заданного темпа торможения есть два взаимосвязанных условия. Их выполнение обеспечивает решение основной задачи позиционирования – остановку механизма в заданной позиции [4].

При торможении со скорости $\omega \leq \omega_n$, как известно из физики и теоретической механики, мгновенные значения скорости и текущего позиционного рассогласования $\Delta u_{\text{п}}$ при выполнении условия $\varepsilon = \text{const}$, связаны следующей нелинейной функциональной зависимостью [4]:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\varepsilon\Delta u_{\text{п}}}{K_i K_{\text{оп}}}}, \quad (34)$$

где $\Delta u_{\text{п}} = \Delta S \cdot K_{\text{оп}}$ – ошибка (рассогласование) перемещения.

С практической точки зрения это означает, что, средствами системы регулирования можно обеспечить функциональную связь скорости движения и позиционного рассогласования, благодаря чему может быть реализован необходимый равнозамедленный процесс, позволяющий привести механизм в

указанную позицию. Коэффициент передачи регулятора положения может быть определён из зависимости:

$$K_{\text{рпс}} = K_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon}{K_i K_{\text{оп}} \Delta u_{\text{п}}}}, \quad (35)$$

где ε – угловое ускорение (замедление) электропривода, рад/с².

Угловое ускорение (замедление) электропривода можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1,1M_{\text{н}} - M_{\Sigma\text{ст}}}{J_{\Sigma}}, \quad (36)$$

$$\varepsilon = \frac{1,1M_{\text{н}} - M_{\Sigma\text{ст}}}{J_{\Sigma}} = \frac{1,1 \cdot 1,75 - 0,945}{0,021} = 46,67.$$

Из зависимости (35) можно сделать вывод, что при величине $\Delta u_{\text{п}}$ стремящейся к нулю, то есть при отработке заданного перемещения, коэффициент передачи регулятора положения будет стремиться к бесконечности.

При отработке регулятором положения малых перемещений коэффициент передачи регулятора следует ограничить величиной $K_{\text{рпм}}$ с целью обеспечения оптимального переходного процесса.

При отработке регулятором положения больших перемещений регулятор должен иметь коэффициент передачи $K_{\text{рпб}}$.

Исходя из этого, для обеспечения оптимальной работы системы управления электроприводом при отработке всех перемещений необходимо выбрать нелинейный регулятор положения, который может изменять коэффициент передачи в зависимости от величины позиционного рассогласования.

Характеристика регулятора положения (зависимость $U_{\text{вых.РП}} = f(\Delta u_{\text{п}})$) строится в следующей последовательности. По зависимости (37) определяется $K_{\text{рп}}$:

$$U_{\text{вых.РП}} = K_{\text{рпс}} \Delta u_{\text{п}} = K_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon \Delta u_{\text{п}}}{K_i K_{\text{оп}}}} = K_{\text{рп}} \cdot \sqrt{\Delta u_{\text{п}}}, \quad (37)$$

$$K_{\text{рп}} = K_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon}{K_i K_{\text{оп}}}}, \quad (38)$$

где $K_{\text{рп}}$ – постоянная часть регулятора при отработке средних перемещений.

$$K_{\text{рп}} = K_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon}{K_i K_{\text{оп}}}} = 0,064 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 46,67}{7 \cdot 1}} = 5,022.$$

После этого выполняется построение параболической характеристики регулятора положения.

Затем строится линейная зависимость $U_{\text{вых.РП}} = K_{\text{рпм}} \Delta u_{\text{п}}$ и определяется точка сопряжения параболы и линейной характеристики, соответствующая разделению отработки малых и средних перемещений. Разделение режимов работы будет происходить при позиционном рассогласовании, равном [4]:

$$K_{\text{рпм}} \Delta u_{\text{п}} = K_{\text{рпс}} \Delta u_{\text{п}}, \quad (39)$$

$$\frac{K_{\text{ос}}}{16T_{\mu} K_{\text{оп}} K_i} \Delta u_{\text{п}} = K_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon \Delta u_{\text{п}}}{K_i K_{\text{оп}}}}, \quad (40)$$

$$\Delta u_{\text{п.min}} = \Delta u_{\text{п}} = 2\varepsilon K_{\text{оп}} K_i (16T_{\mu})^2, \quad (41)$$

$$\Delta u_{п.мин} = 2\varepsilon K_{оп} K_i (16T_\mu)^2 = 2 \cdot 46,67 \cdot 1 \cdot 7 \cdot (16 \cdot 0,002)^2 = 0,0014.$$

При отработке больших перемещений выход регулятора положения должен быть ограничен величиной задания максимальной скорости вращения $U_{вых.РП} = U_{зс.мах} = K_{ос} \omega_H$.

Таким образом, разделение режимов работы при отработке средних и больших перемещений будет происходить при позиционном рассогласовании, равном:

$$K_{рпс} \Delta u_{п} = K_{ос} \omega_H, \quad (42)$$

$$K_{ос} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon \Delta u_{п}}{K_i K_{оп}}} = K_{ос} \omega_H, \quad (43)$$

$$\Delta u_{п.мах} = \Delta u_{п} = \frac{\omega_H^2 K_i K_{оп}}{2\varepsilon}, \quad (44)$$

$$\Delta u_{п.мах} = \frac{\omega_H^2 K_i K_{оп}}{2\varepsilon} = \frac{157,08^2 \cdot 7 \cdot 1}{2 \cdot 46,67} = 3,965.$$

Таким образом, характеристика регулятора положения имеет три участка: линейный при отработке малых перемещений ($0 \leq \Delta u_{п} \leq \Delta u_{п.мин}$), параболический до участка ограничения при отработке средних перемещений ($\Delta u_{п.мин} < \Delta u_{п} \leq \Delta u_{п.мах}$), и участок ограничения выходного напряжения регулятора при отработке больших перемещений с максимальной скоростью ($\Delta u_{п} > \Delta u_{п.мах}$).

3.6 Моделирование переходных процессов электропривода

Для расчета переходных процессов и оценки статических и динамических характеристик привода горизонтального перемещения спроектированной системы управления была разработана математическая модель, реализованная в

графической среде Simulink программного пакета Matlab. Математическая модель привода горизонтального перемещения автооператора автоматической линии гальванизации приведена на рисунке 5 и в приложении Е.

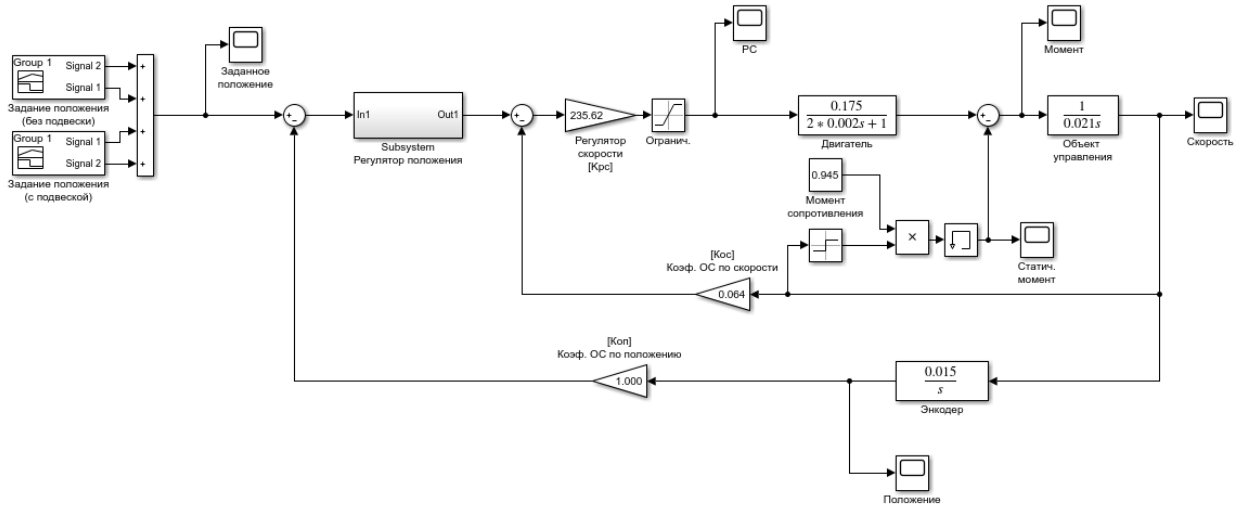


Рисунок 5 – Математическая модель привода горизонтального перемещения автооператора автоматической линии гальванизации

Математическая модель регулятора положения отдельно приведена на рисунках 6 и 7.

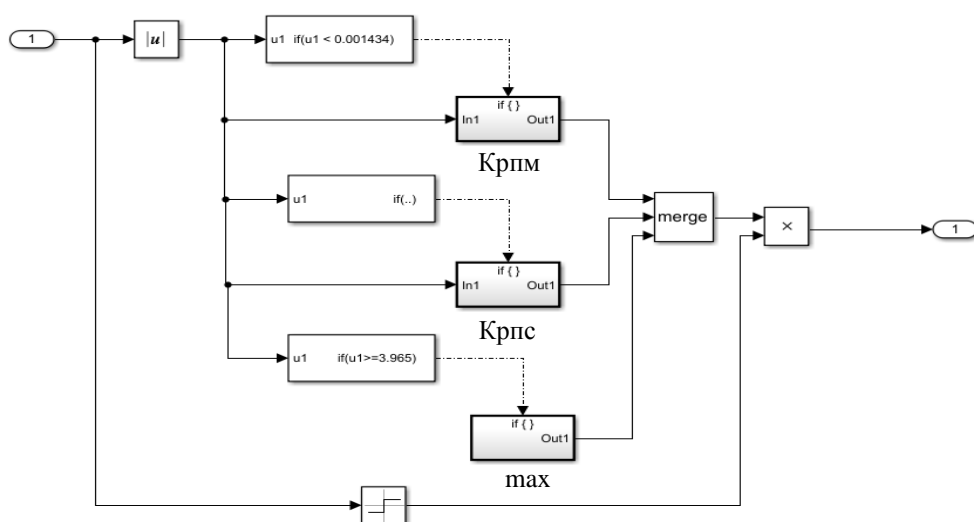


Рисунок 6 – Математическая модель регулятора положения

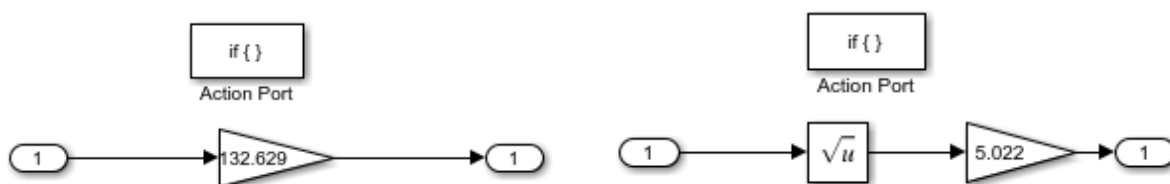


Рисунок 7 – Коэффициенты K_{ppm} и K_{ppc} регулятора положения

Далее, на основании разработанной математической модели было проведено моделирование переходных процессов электропривода в той же графической среде Simulink программного пакета Matlab.

График задающего сигнала приведён на рисунке 8. Данный график отображает следующую последовательность действий привода горизонтального перемещения автооператора:

- автооператор перемещается без подвески с грузом вправо до первой ванны;
- автооператор захватывает подвеску с грузом в первой ванне путём смещения автооператора на 100 мм вправо;
- автооператор перемещается с захваченной подвеской с грузом вправо до второй ванны;
- автооператор отпускает подвеску с грузом во второй ванне путём смещения автооператора на 100 мм влево;
- автооператор перемещается без подвески с грузом влево на исходную позицию.

При этом расстояние между исходной позицией и между ваннами принято равным 1,2 метра, а время, в течение которого передвигается автооператор между ними принято равным примерно 4 секундам. Данные значения являются средним значением по необходимому расстоянию и времени для передвижения автооператоров между соседними ваннами на участке.

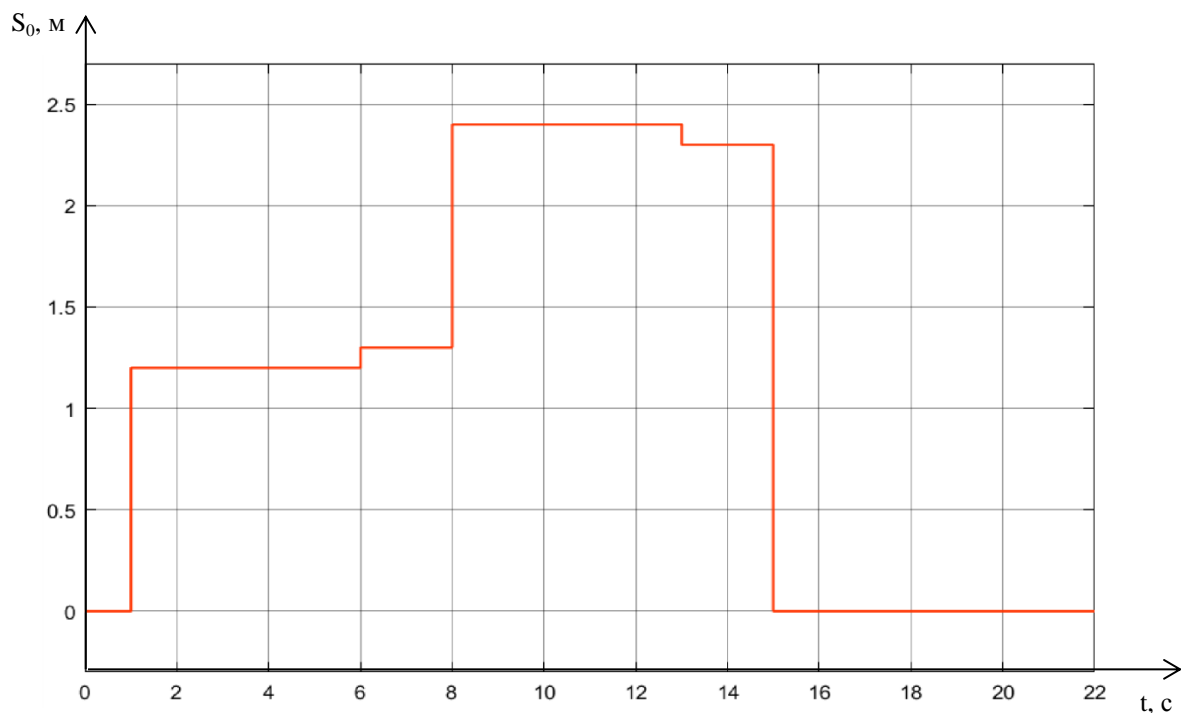


Рисунок 8 – График задания положения автооператора

Графики переходных процессов по скорости и моменту двигателя и по положению привода в соответствии с заданными положениями приведены на рисунках 9, 10 и 11 соответственно.

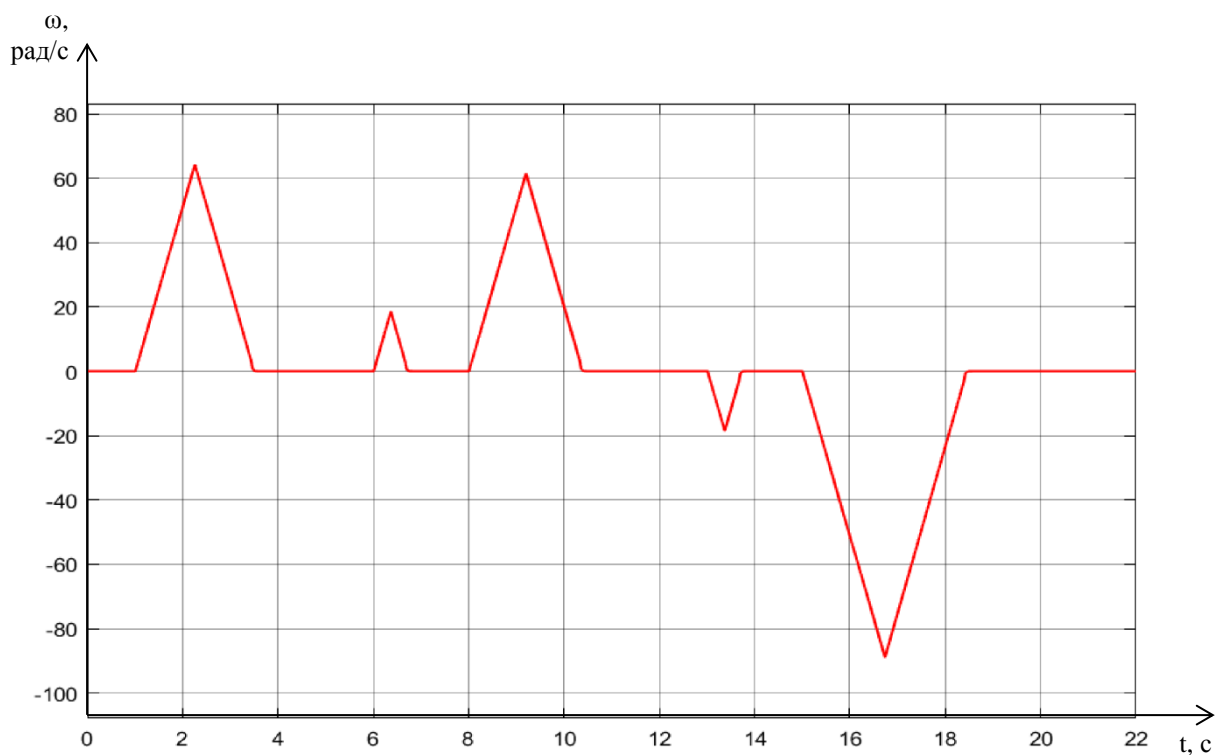


Рисунок 9 – График переходного процесса скорости

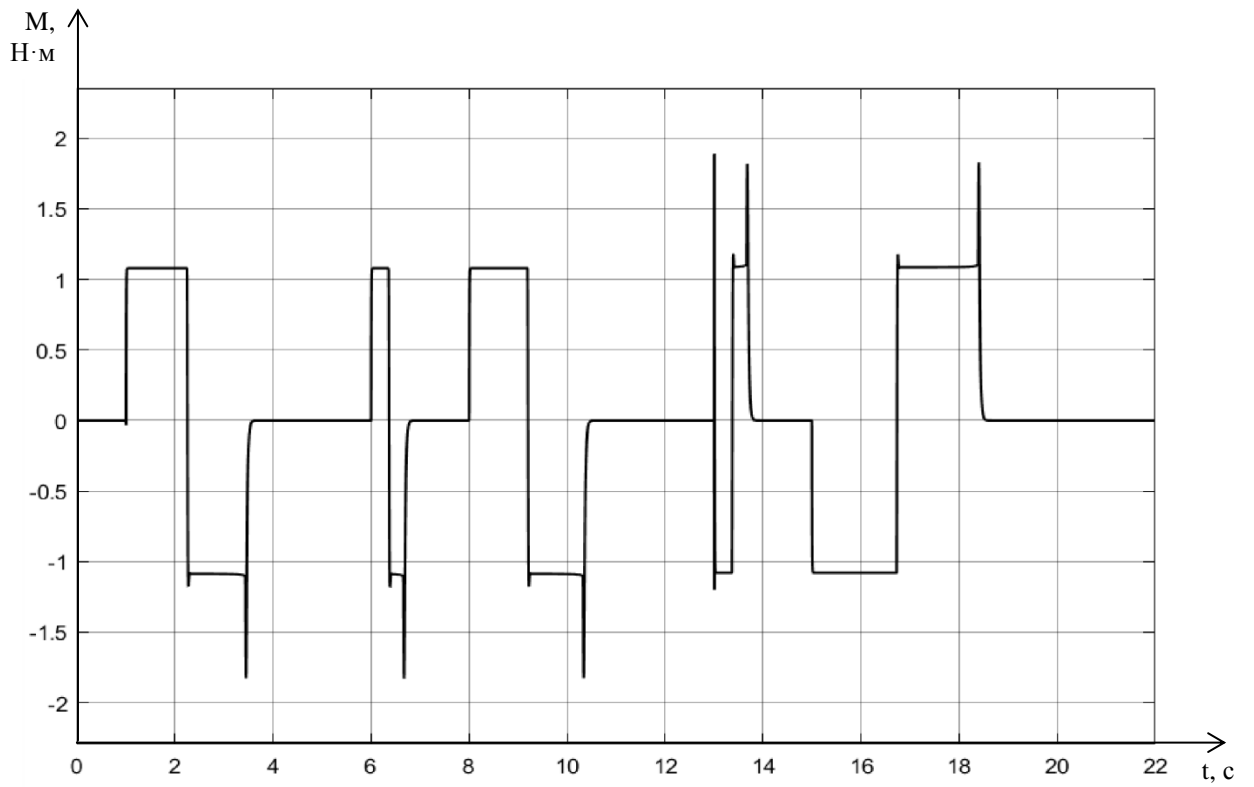


Рисунок 10 – График переходного процесса момента

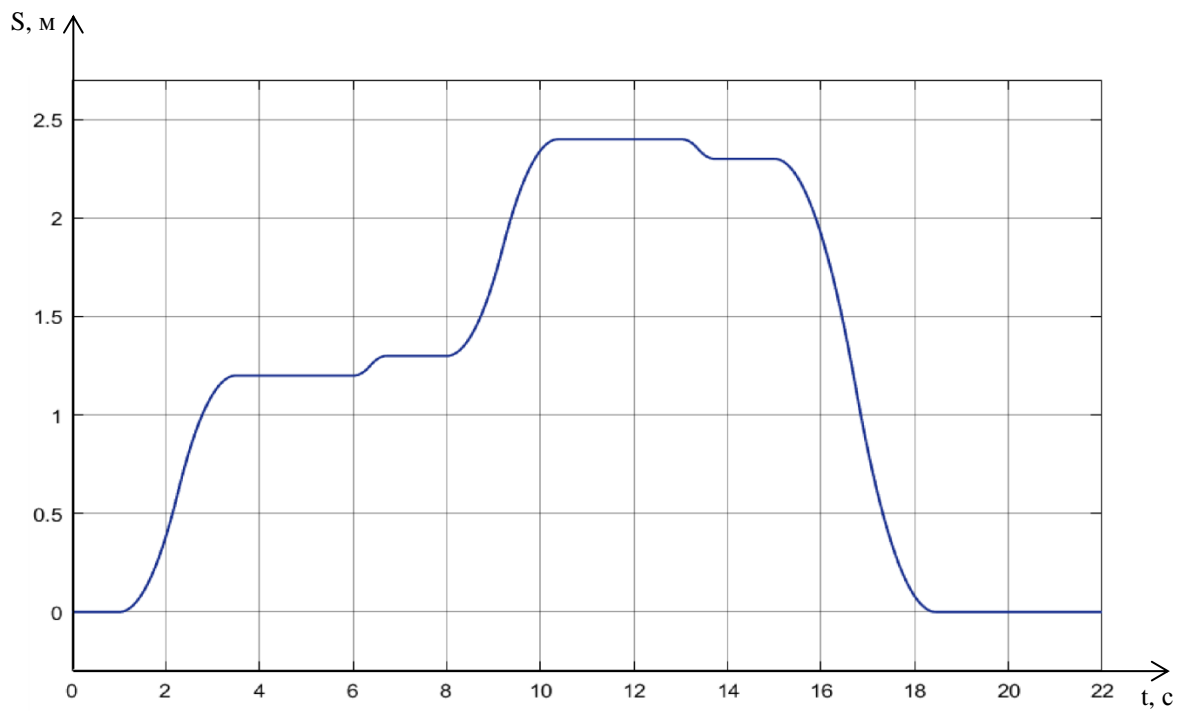


Рисунок 11 – График переходного процесса перемещения

Для большей наглядности переходных процессов при перемещении на малые расстояния на рисунках 12, 13 и 14 приведены графики переходных процессов для малых перемещений.

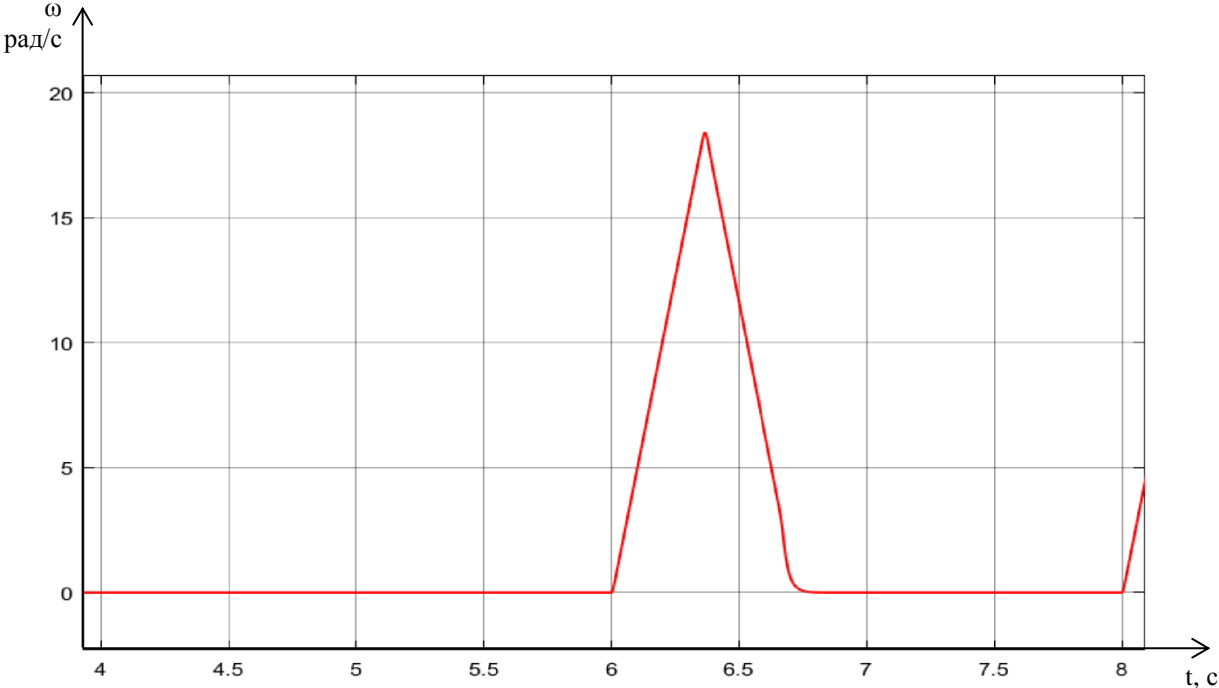


Рисунок 12 – График переходного процесса скорости для малых перемещений

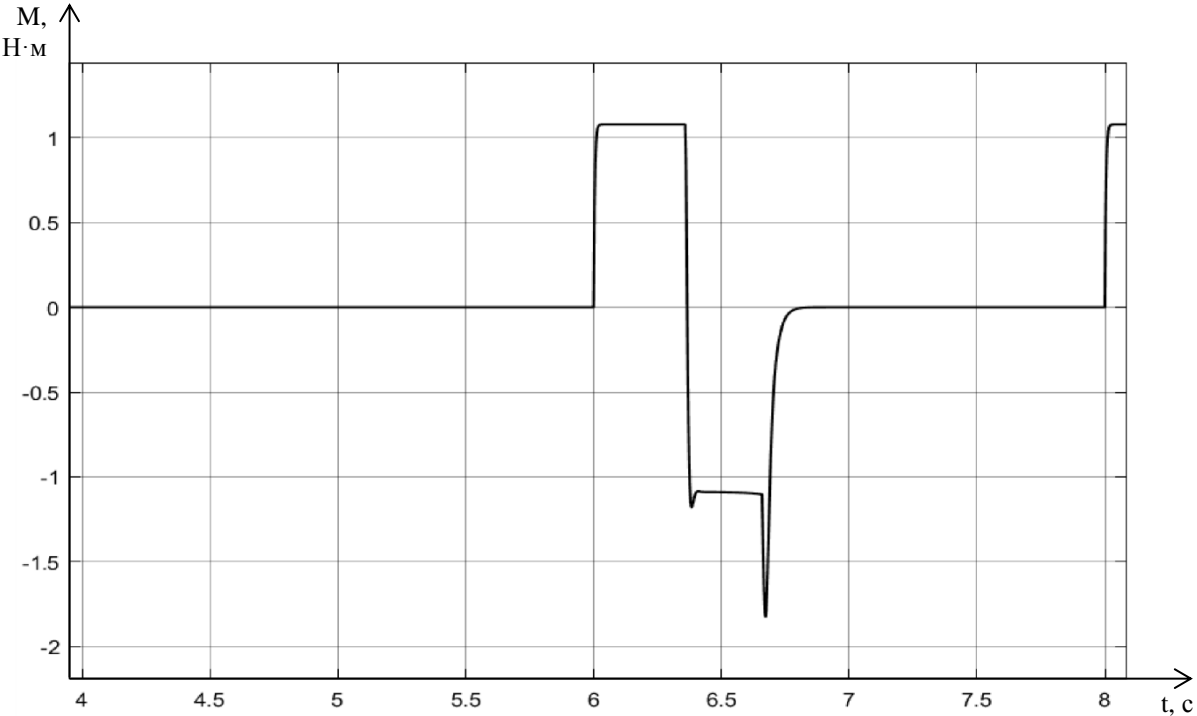


Рисунок 13 – График переходного процесса момента для малых перемещений

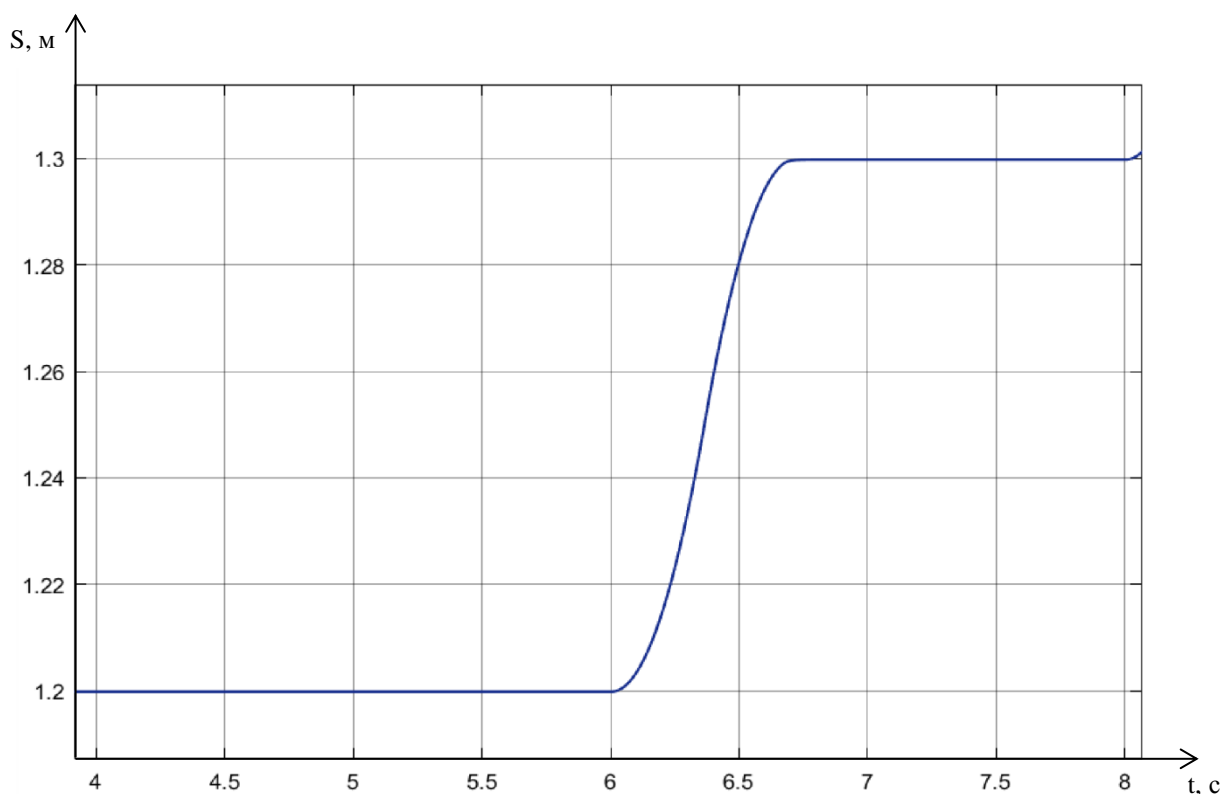


Рисунок 14 – График переходного процесса перемещения для малых перемещений

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что спроектированная система электропривода полностью удовлетворяет главным требованиям к системе, а именно: поддержание заданного значения по положению, скорости и моменту, устранение статической ошибки, отсутствие перерегулирования в переходном процессе по положению. При этом для всех контуров управления получены оптимальные переходные процессы, обеспечивающие максимальное быстродействие при минимальном перерегулировании.

Результаты моделирования привода горизонтального перемещения автооператора приведены в приложение Ж.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Подробное описание структуры регулятора положения привода горизонтального перемещения, его функционирования и расчёт его параметров приведены в пунктах 3.5.5 и 3.6.

Исходя из приведённого описания, был составлен алгоритм работы программы регулятора положения, приведённый в приложении К.

Листинг программы регулятора положения для микроконтроллера, согласно данному алгоритму, приведён в приложении Л.

Подробный анализ структуры системы управления и её функционирования, приведены в пунктах 1 и 3. Исходя из приведённого описания, был составлен укрупнённый алгоритм функционирования системы управления, приведённый в приложении М.

Рассмотрим основные части данного алгоритма подробнее.

На первой странице приложения М приведён основной цикл алгоритма системы управления. В данном цикле располагаются все условия срабатывания различных элементов алгоритма, такие как:

- условие остановки автооператоров;
- условие экстренного останова автооператоров;
- условие сброса переменных и установки автооператоров на исходные позиции;
- условие включения ручного режима и управления автооператорами с пульта дистанционного управления;
- условие работы автооператоров в автоматическом режиме;
- условие разрешения работы регулятора положения привода горизонтального передвижения автооператора №1 (интеллектуального модуля FM 354);

- условие разрешения работы регулятора положения привода горизонтального передвижения автооператора №2 (интеллектуального модуля FM 354);
- условие работы привода вертикального перемещения автооператора №1;
- условие работы привода вертикального перемещения автооператора №2;
- условие завершения программы;
- условие перехода к началу основного цикла.

На второй странице приложения М приведены алгоритмы работы приводов подъёма автооператоров, которые включают следующие условия:

- условие захвата подвесок;
- условие отпускания подвесок;
- условие задержки автооператора в ванне в нижнем положении на определённое время;
- условие задержки автооператора в верхнем положении на определённое время;
- условие задания следующей позиции автооператора;

На третьей странице приложения М приведён алгоритм работы системы управления в ручном режиме и управления автооператорами с пультов дистанционного управления.

Алгоритм подпрограммы регулятора положения для обоих автооператоров имеет вид аналогичный приведённому алгоритму в приложении К.

Листинг программы для микроконтроллера, согласно данному алгоритму, приведён в приложении Н.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе была модернизирована мехатронная система автооператоров линии гальванизации, в частности проведён анализ объекта автоматизации, разработана функциональная схема системы управления, схема электрическая привода перемещения, а также произведён расчёт электропривода, построена математическая модель привода горизонтального перемещения и получены результаты моделирования его переходных процессов, разработан алгоритм работы системы управления и написана соответствующая программа для программируемого логического контроллера.

Посредством модернизации мехатронной системы автооператоров линии гальванизации были достигнуты следующие результаты:

- снижена трудоёмкость ремонта датчиков положения;
- облегчён процесс задания положений ванн, поскольку для этого нужно только поменять значения в программе, манипуляции с датчиками на балке не требуются;
- повышена надёжность мехатронной системы и снижено время её ремонта;
- увеличена производительность мехатронной системы ввиду повышения её надёжности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Так же автор предлагает рассмотреть преимущества и недостатки цинкования гальваническим методом. – <https://poisk-ru.ru/s1030t6.html>.
2. Курсовая работа по мпсау. – <http://add.coolreferat.com/docs/index-5102.html>.
3. Программируемый контроллер S7-300. Данные модулей. – http://www.empa.ru/Simatic_doc/S7-300/3_DigitalModules_r.pdf.
4. КУРСОВОЕ проектирование СУЭП. – <https://studfiles.net/preview/6218563/page:5/>.
5. В.М. Терехов. Системы управления приводов: учебное пособие / В.М. Терехов, О.И. Осипов; – М.: ИЦ Академия, 2005. – 300 с.
6. ГОСТ 24.104-85 ЕСС АСУ. Автоматизированные системы управления. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.
7. ГОСТ 34.601-90 ЕСС АСУ. Автоматизированные системы. Стадии создания. – М.: Стандартинформ, 2009. – 6 с.
8. ГОСТ 21.404-85 Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.