

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

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Служба безопасности ЧТПЗ

2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2017 г.

Разработка мехатронной системы передаточной тележки для перемещения
труб участка антикоррозийного покрытия труб цеха «Высота-239» ПАО «ЧТПЗ»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ – 15.03.06.2017.234. ПЗ (ВКР)

Консультант
Профессор, д.э.н.
Е.В. Кучина

2017 г.

Руководитель работы
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2017 г.

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2017 г.

Автор работы
студент группы П-456
Павел Олегович Скрипов

2017 г.

Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2017 г.

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Институт Политехнический институт
Факультет Механико-технологический
Кафедра Мехатроники и автоматизации
Направление 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
Профиль Мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ В.Р. Гасияров
подпись

«__» _____ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА**

Студенту группы П-456

Скрипову Павлу Олеговичу
(Ф.И.О. полностью)

1 Тема работы

Разработка мехатронной системы передаточной тележки для перемещения труб участка
антикоррозийного покрытия труб цеха «Высота-239» ПАО «ЧТПЗ».

утверждена приказом по университету от _____ 201_ г. № _____
(утверждена распоряжением по факультету от _____ 201_ г. № _____)

2 Срок сдачи студентом законченной работы _____

3 Исходные данные к работе материалы производственной практики

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Введение

1. Анализ технологического процесса и выбор основного оборудования.

1.1. Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма

1.2. Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

1.3. Требования к приводам и системе автоматизации

1.4. Выбор системы привода

1.5. Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы (диаграммы перемещения)

1.6. Выбор основного силового оборудования

1.7. Защиты привода, расчет уставок защитных устройств

2. Разработка САУ

2.1. Разработка архитектуры систем автоматизации

2.2. Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

2.3. Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата

2.4. Разработка контура регулирования технологических координат

2.5. Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

3. Техничко-экономические расчеты

- 3.1. Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции
- 3.2. Расчёт производственной программы цеха (расчет фактического годового фонда рабочего времени и производительности оборудования)
- 3.3. Расчёт сметы капитальных затрат (расчёт стоимости приобретенного оборудования, затрат на монтаж оборудования, величины транспортных расходов, заготовительно-складских расходов, затрат на запасные части и расходов на комплектацию оборудования)
- 3.4. Расчет РСЭО (затраты на содержание и эксплуатацию оборудования потери электроэнергии, расчет амортизационных отчислений, затраты на ремонты и обслуживание электрооборудования)
- 3.5. Расчет затрат на материалы и на оплату труда со страховыми отчислениями
- 3.6. Расчет прибыли и показателей рентабельности
- 3.7. Расчет срока окупаемости проекта
- 3.8. Составление сводной таблицы технико-экономических расчетов
- Заключение

5 Перечень графического и иллюстративного материала

- 1. Кинематическая схема и технические характеристики механизма
- 2. Тахограммы (диаграмма перемещения) и нагрузочные диаграммы проектируемого привода
- 3. Требование к проектируемому приводу и системе автоматизации
- 4. Архитектура САУ
- 5. Функциональная схема САУ и характеристики выбранного оборудования
- 6. Функциональная схема проектируемой САУ
- 7. Математическая модель проектируемой САУ
- 8. Результаты моделирования типовых режимов работы привода
- 9. Техничко-экономические показатели

Всего 9 листов

Согласовано:

Консультант по экономике и
управлению производством:

подпись

Фамилия И.О.

Руководитель

подпись

Должность, звание

Фамилия И.О.

Дата выдачи задания « » _____ 201 г.

Задание принял к исполнению студент

подпись

Фамилия И.О.

АННОТАЦИЯ

Скрипов П.О. Разработка мехатронной системы передаточной тележки для перемещения труб участка антикоррозийного покрытия труб цеха «Высота 239» ПАО ЧТПЗ. – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2017, 74 с., 24 ил., 12 табл., библиогр. список – 23 наим.

Цель выпускной квалификационной работы – разработка мехатронной системы передаточной тележки для перемещения труб участка антикоррозийного покрытия цеха «Высота-239» ПАО «ЧТПЗ».

Задачи выпускной квалификационной работы – рассчитать основные силовые агрегаты и убедиться в рациональном их использовании. Проанализировать работу передаточной тележки для перемещения труб. Научиться рассчитывать и подбирать основные узлы и агрегаты для конкретного выполнения поставленной задачи. Научиться строить диаграммы и тахограммы привода, а также создавать кинематические схемы. Рассчитать основные экономические показатели и провести их анализ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ	9
1.1 Характеристика цеха Высота 239 и участка внутреннего антикоррозийного покрытия труб. Описание технологического процесса работы передаточной тележки для перемещения труб	9
1.2 Характеристика и кинематическая схема передаточной тележки	19
1.3 Требования к приводу и системе автоматизации передаточной тележки.....	22
1.4 Выбор системы привода	23
1.5 Расчет и построение тахограммы и нагрузочной диаграммы привода передвижения передаточной тележки.....	24
1.6 Проверка двигателя по условиям нагрева и перегрузки	34
1.7 Выбор преобразователя частоты	36
1.8 Защиты привода. Расчет уставок защитных устройств	41
2 СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ.....	44
2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации	44
2.2 Выбор контроллера для реализации автоматического управления электроприводом транспортной тележки.	46
2.3 Выбор датчиков для реализации автоматического управления электроприводом транспортной тележки	49
2.4 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода передаточной тележки.	52
2.5 Разработка контура регулирования технологических координат	55
2.6 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода	55
3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	64
3.1 Расчет производственной программы цеха	64
3.2 Расчет сметы капитальных затрат	65

3.3	Расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования	67
3.4	Оценка эффективности капитальных вложений.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК		74

ВВЕДЕНИЕ

Современный мировой рынок трубной продукции все в большей мере требует более качественных изделий различного сортамента, применяемых для нужд нефте- и газодобывающих компаний, производств, для жилищно-коммунальных нужд и других сфер. Повышенным спросом пользуются трубы большого диаметра, предназначенные для транспортировки нефти и газа. Производство качественной трубной продукции возможно при соблюдении высоких требований к металлу, трубопрокатному оборудованию, а также при точном выполнении требований к технологическому процессу производства труб.

На технологию современного трубопрокатного производства существенное влияние оказывают все возрастающие требования и к отделке готовых труб. Новые технологии в сырьевой промышленности и разработка труднодоступных месторождений переопределили особые требования к качеству трубопрокатной продукции по дополнительному антикоррозионному покрытию поверхности, качеству швов, обработке торцов сортового проката, износостойкости и ряду других требований.

Цех «Высота 239» оснащен современным оборудованием по обработке металла, а также механизмов транспортировки готовых изделий и заготовок. Цех осуществляет выпуск продукции разного сортамента и назначения, в том числе трубы, предназначенные для транспортировки углеводородов, со специальным антикоррозионным полимерным покрытием, внутренней и внешней стороны. Одним из элементов технологического процесса на линии внутреннего антикоррозионного покрытия является транспортировка трубы для последующей передачи на другие станции [1].

В разделе общая часть дипломного проекта рассмотрены: технологический процесс и техническая характеристика механизма передаточной тележки для транспортировки труб, произведен расчет и выбор основного оборудования, произведен расчет и построение тахограммы и нагрузочной диаграммы работы механизмов передаточной тележки.

В разделе специальная часть дипломного проекта приведена структурная схема ПЧ-АД привода передвижения передаточной тележки, смоделирована управляющая часть мехатронной системы.

В разделе экономическая часть дипломного проекта рассмотрены: инвестиционные затраты на поставку оборудования передаточной тележки, приведен расчет затрат на обслуживание и эксплуатацию.

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1 Характеристика цеха Высота 239 и участка внутреннего антикоррозионного покрытия труб. Описание технологического процесса работы передаточной тележки для перемещения труб

Современный цех по производству труб большого диаметра «Высота 239», проектная мощность 900000 тонн труб большого диаметра в год. Осуществляет выпуск одношовных сварных труб диаметром до 1420 мм с толщиной стенки до 48 мм, длиной 12 и 18 метров, с наружным и внутренним покрытием. Основное назначение - транспортировка нефти и газа [1].



Рисунок 1.1 – Упрощенная схема технологического процесса изготовления электросварных труб цеха «Высота 239»

В качестве исходного материала для полуавтоматической линии производства труб большого диаметра методом сварки под флюсом используются металлические листы (Рис 1.1 блок 1) [2].

Укладка листа производится цеховым краном на кантователь, где выполняется визуальный контроль листа. Лист снимается с кантователя при помощи листоукладчика и укладывается на рольганговые весы. После чего осуществляется переход листа на рольганг с устройством центрирования листа.

Лист поступает на участок автоматического контроля геометрии листа, где осуществляются следующие операции: измерение длины листа, измерение ширины листа, измерение серповидности, измерение толщины, измерение волнистости. Если выявлено несоответствие листа необходимым значениям, проводится вывод отбракованного листа с линии при помощи листоукладчика (Рис 1.1 блок 4).

По транспортным рольгангам лист поступает на дробеметную установку, где происходит удаление прилипшей грязи и окалины (Рис 1.1 блок 5). Далее по транспортным рольгангам лист поступает на участок маркировки. На станции приварки технологических пластин автоматически производится приварка пластин к четырем углам листа в продольном направлении (Рис 1.1 блок 6).

На кромкофрезерной машине производится обработка продольных кромок листа. Лист поступает на загрузочный рольганг, где производится предварительное центрирование листа вручную. После чего лист автоматически центрируется и поступает на вводной рольганг, где происходит центрирование и замеры листа. Скорость резания фрезой рассчитывается исходя из данных замеров листа. Транспортная тележка с листом проходит через фрезу, после чего лист поступает на выводной рольганг (Рис 1.1 блок 8).

На гидравлическом кромкогибочном прессе происходит одновременное пошаговое загибание обеих кромок листа. Вводной рольганг транспортирует лист на первую позицию гибки. Лист поднимается и зажимается зажимной траверсой, при этом поднимается центральный рольганг. Выполняется первый шаг гибки. После чего зажимная и гибочная траверсы, а также центральный рольганг

опускаются. Лист переводится в позицию второго шага гибки. Пошаговая гибка кромок листа производится, пока лист не будет загнут по всей длине. После этого лист транспортируется выводным рольгангом (Рис 1.1 блок 9).

На трубоформовочном прессе проводится шаговая формовка листа для производства шлицевых труб. В составе полуавтоматической линии два трубоформовочных прессы для формовки труб различной длины: 12 м и 18 м. Лист поступает на рольганг для листов. Рольганг опускается, одновременно роликовые планки, поддерживая лист, поднимают его вверх. Манипуляторы вталкивают лист на позицию, где выполняется первая формовочная операция. После этого лист опускается. Для выполнения второй формовочной операции манипуляторы снова вталкивают лист на позицию формовки. Пошаговая формовка листа осуществляется поэтапно до достижения оси листа. После этого лист при помощи манипуляторов поворачивается поперек и производится формовка второй половины листа в том же порядке, начиная от кромки листа до оси листа. Готовая шлицевая труба поднимается опорным рольгангом и выводится из прессы при помощи выводящего рольганга (Рис 1.1 блок 10).

После формовки шлицевая труба поступает на стенд выборочного контроля.

На сборочно-сварочном стане происходит сборка и сварка трубных заготовок по всей длине технологического шва. Труба поступает на вводной рольганг и при помощи поворотных устройств устанавливается в позицию варки (12 часов). Цепной конвейер подает заготовку в клетку сварки. Труба зажимается балками клетки сборочной сварки. Включается сварочная дуга, а цепной конвейер с постоянной скоростью перемещает трубу через сварочный стенд. При этом производится непрерывная сварка технологического шва (Рис 1.1 блок 11). После окончания сварки шва трубы, разжимаются балки клетки сборочной сварки, и труба поступает на выводной рольганг.

При помощи маркировочного устройства наносится номер трубы по обеим сторонам трубы. Труба поступает на поперечную транспортную тележку и поворачивает в позицию маркировки поворотным механизмом. Маркировочный узел объезжает оба конца трубы и наносит в продольном направлении номер.

Труба переворачивается на вторую позицию маркировки. После этого труба выводится из узла, номер наносится сначала на один конец трубы по периметру трубы, а затем на другой конец трубы по периметру. Трубы выводятся из узла маркировки трубы (Рис 1.1 блок 12).

Труба поступает на контрольный стенд технологического шва, где проводится ручной ремонт ошибок, обнаруженных на технологическом шве (Рис 1.1 блок 12).

На машине для сварки внутреннего шва выполняется сварка внутреннего шва после сварки шва технологическим швом (Рис 1.1 блок 14). Труба поступает через поперечную тележку на продольную тележку. Продольная тележка подводит трубу под балку сварочной установки до уровня сварочной точки над планками. Поворотные ролики позиционируют трубу под точкой сварки. Включается заземление. Сварочное устройство опускается над трубой и начинается процесс сварки, при этом начинается движение продольной тележки, а сварочные ролики направляют сварочные головки. Когда сварочная головка доходит до планок на другом конце трубы, процесс сварки прекращается и сварочное устройство поднимается. И после этого труба передается на вывод из узла сварки.

Шлаки, образовавшиеся в процессе сварки, удаляются механическим способом: передвижной щеточный узел и система вытяжки пыли и мелких фракций (Рис 1.1 блок 15).

Выборочно трубы проверяются на контроле внутреннего сварного шва с использованием видеокамеры.

Окончательная сварка труб осуществляется на машине для сварки внешнего шва (Рис 1.1 блок 16). Сваренная внутренним швом труба перекладывается транспортным устройством на продольную тележку, где происходит поворот трубы в положение под сварочное устройство. Включается заземление. Сварочное устройство опускается над трубой и начинается процесс сварки, при этом начинается движение продольной тележки, а сварочные ролики направляют сварочные головки. Когда сварочная головка доходит до планок на другом конце трубы, процесс сварки прекращается и сварочное устройство поднимается. После

удаления корки производится принудительное охлаждение шва спреями, после чего труба передается на вывод из узла сварки.

Шлаки, образовавшиеся в процессе сварки, удаляются при помощи передвижного щеточного узла.

Выборочно трубы проверяются на контроле внешнего сварного шва визуально.

Отрезание технологических планок осуществляется на устройстве отрезания технологических пластин. Труба поступает на транспортный рольганг и поворачивается так, что технологические пластины находятся в положении параллельном плоскости пола, после чего происходит отрезка пластин устройством плазменной резки при помощи промышленного робота. Далее осуществляется сдвиг трубы с устройством отрезания технологических пластин для отрезания технологических пластин на другом конце трубы. Трубы выводятся с устройства отрезания технологических пластин (Рис 1.1 блок 18).

Установка ультразвукового контроля №1 осуществляет контроль сварных соединений для выявления продольных и поперечных дефектов, осуществляется автоматически (Рис 1.1 блок 19). На установке рентгеновского контроля №1 осуществляется выборочный контроль сварного соединения по всей длине, а также контроль дефектных мест, выявленных в ходе ультразвукового контроля. После открытия шторок рентгеновской камеры происходит регулировка оборудования по диаметру трубы. Шов трубы поворачивается в позицию «12 часов». Труба поступает в камеру рентгеновского контроля. Одновременно с вводом трубы осуществляется перемещение рентгеновской трубки по внутренней полости трубы в место фиксации консоли замковым фиксатором. Оператор закрывает шторки рентгеновской камеры и запускается процесс просвечивания шва. По окончании процесса просвечивания, труба выводится из рентгеновской камеры.

Если в процессе ультразвукового или рентгеновского контроля были выявлены дефекты, то трубы поступают на стенды ремонта труб.

Для отрезания дефектных концов труб применяется машина для газовой резки. Труба по рольгангу передается в зону действия газового резака, где осуществляется позиционирование резака по месту реза. Отрезанная резаком часть трубы удаляется при помощи цехового крана.

Механический однопозиционный экспандер осуществляет ступенчатое расширение трубы и обеспечивает необходимую геометрию трубы. Труба на приводных тележках подается на промывку внутренней полости, для чего труба устанавливается в люнетах и вращение трубы с одновременной подачей эмульсии. После промывки шов устанавливается в положение «12 часов» и проводится центровка оси трубы с осью правки, для чего труба устанавливается на свободный конец консоли, срабатывает клещевой захват и осуществляется пошаговая подача трубы по направлению к главному цилиндру. Начинается рабочий ход расширения. Труба перемещается на следующий шаг и осуществляется следующий шаг расширения. Этот процесс проводится до конца трубы. После этого труба возвращается в исходную позицию. Поперечная транспортная тележка перемещает трубу на экспандер 2, где производится расширение второй половины трубы, по тому же принципу, что и на экспандере 1 (Рис 1.1 блок 22).

Полностью расширенная труба поступает на позицию промывки. На первом этапе промывки труба движется вперед и промывается внутренняя часть трубы с использованием эмульсии. На втором этапе труба движется назад и промывается внутренняя часть трубы чистой водой. На заключительном этапе промывается чистой водой внешняя часть трубы. После этого труба выводится из зоны экспандера.

На измерительном стенде экспандера осуществляется ручной контроль геометрии трубы.

Удаление внутреннего и внешнего валика шва на концах труб производится на машине удаления внутреннего и внешнего валика шва на концах труб методом шлифования (Рис 1.1 блок 23). Труба поступает на транспортный рольганг, где позиционируется в положение «12 часов». Тележки перемещения подходят к

концам трубы и по достижению кромок трубы шлифовальные машины зажимаются на кромках трубы. Осуществляется шлифовка валика шва. По окончании шлифовки труба выводится из узла шлифовки трубы машины разжимаются и уходят от трубы. Труба выводится из узла шлифовки конца трубы при помощи поперечной транспортной тележки.

Торцовка обоих концов труб осуществляется на станке для торцовки концов труб. Труба подается до оси станков при помощи тележки поперечного перемещения и поднимается подъемными устройствами до оси шпинделей. Станки торцовки одеваются на концы труб и зажимаются гидравлически. Производится торцовка концов труб. По окончании процесса торцовки станки разжимаются и уходят от трубы. Труба выводится из узла торцовки концов труб.

На гидростатическом прессе осуществляется гидроиспытание труб (Рис 1.1 блок 24). Труба выверяется по продольной оси промывочного узла и при помощи тележки продольного перемещения принимается и укладывается в позицию промывки. Труба поворачивается и промывается, после чего подается на продольный рольганг. Поперечный толкатель передает трубу на гидроиспытательный пресс. Труба поднимается. Воздуховыпускная головка перемещается вперед. При испытательном давлении ≥ 25 герметизация трубы с обоих концов осуществляется путем прижима испытательных манжет. Открывается наполнительный клапан, и труба заполняется испытательной водой, а воздух выпускается. После чего создается испытательное давление посредством спаренного мультипликатора с гидравлическим приводом. Испытательное давление выдерживается определенное время, при этом оператором проводится визуальный контроль трубы. После испытания давление сбрасывается через регулируемый спускной клапан. Инструменты отводятся и освобождают трубу. Устройство зажима трубы разжимается, и труба опускается и поперечным толкателем выводится из зоны испытания. Окончательный слив воды происходит после ее наклона гидравлическими домкратами, после чего трубы выводятся из узла гидростатического прессы.

Установка ультразвукового контроля №2 осуществляет контроль сварных соединений для выявления продольных и поперечных дефектов, осуществляется автоматически (Рис 1.1 блок 25).

После сдаточного ультразвукового контроля предусмотрен инспекционный контроль: измерение отклонения трубы от прямолинейности, овальности; измерение толщины и твердости шва по длине до 300 мм по сторонам трубы; контроль внутренних дефектов на длине до 100 мм по сторонам трубы (Рис 1.1 блок 26).

На установке рентгеновского контроля №2 осуществляется контроль дефектных мест, выявленных в ходе ультразвукового контроля №2 (Рис 1.1 блок 27). После открытия шторок рентгеновской камеры происходит регулировка оборудования по диаметру трубы. Шов трубы поворачивается в позицию «12 часов». Труба поступает в камеру рентгеновского контроля. Одновременно с вводом трубы осуществляется перемещение рентгеновской трубки по внутренней полости трубы в место фиксации консоли замковым фиксатором. Оператор закрывает шторки рентгеновской камеры и запускается процесс просвечивания шва. По окончании процесса просвечивания, труба выводится из рентгеновской камеры.

Если в процессе ультразвукового контроля №2 или рентгеновского контроля №2 были выявлены дефекты, то трубы поступают на стенды ремонта труб.

На установке рентгеновского контроля №3 осуществляется контроль дефектных мест сварного шва на длине до 300 мм по концам труб.

После открытия шторок рентгеновской камеры происходит регулировка оборудования по диаметру трубы. Шов трубы поворачивается в позицию «12 часов». Труба поступает в камеру рентгеновского контроля. Одновременно с вводом трубы осуществляется перемещение рентгеновской трубки по внутренней полости трубы в место фиксации консоли замковым фиксатором. Оператор закрывает шторки рентгеновской камеры, и запускается процесс просвечивания шва. По окончании процесса просвечивания, труба выводится из рентгеновской камеры.

Помимо рентгенотелевизионного контроля проводится и рентгенографический контроль. После открытия шторок рентгеновской камеры происходит регулировка оборудования по диаметру трубы. Шов трубы поворачивается в позицию «12 часов». Труба поступает в камеру рентгеновского контроля. Установка пленки или многоразовых пластин на трубе осуществляется при помощи магнитной ленты на поверхности трубы вручную оператором. Оператор закрывает шторки рентгеновской камеры и запускается процесс. После открытия шторок пленки или пластины снимаются вручную с трубы и проявляются или считываются сканером.

На установке магнитопорошковой дефектоскопии проводится автоматический контроль концов труб на наличие поверхностных и близких к поверхности дефектов по люминесцентному методу (Рис 1.1 блок 31). Труба поступает на участок контроля, где происходит вращение трубы при помощи люнет для установки и поворота трубы. На концы трубы подается суспензия, состоящая из флуоресцирующего магнитного порошка, воды и релаксатора. Суспензия становится видимой в ультрафиолетовых лучах. Для контроля процесса используются видеокамеры. В случае обнаружения дефекта происходит маркировка места его положения.

На участке заводского контроля трубы взвешивают на весах и маркируют при помощи установки для изготовления шаблонов и нанесения маркировки (Рис 1.1 блок 33) [2].

Характеристика участка антикоррозийного покрытия труб

Линия внутреннего покрытия труб входит в состав Челябинского трубопрокатного завода, цеха Высота 239. Оборудование на данной технологической линии используется для нанесения внутреннего антикоррозийного покрытия на стальные трубы и транспортировки труб на технологические линии для проверки соответствия техническим условиям на производство газовых/нефтяных труб диаметром до 1420 мм, предназначенных для работы под давлением до 250 атм.

Расчетная годовая производительность оборудования на участке антикоррозионного покрытия до 400.000 тонн в год [2].

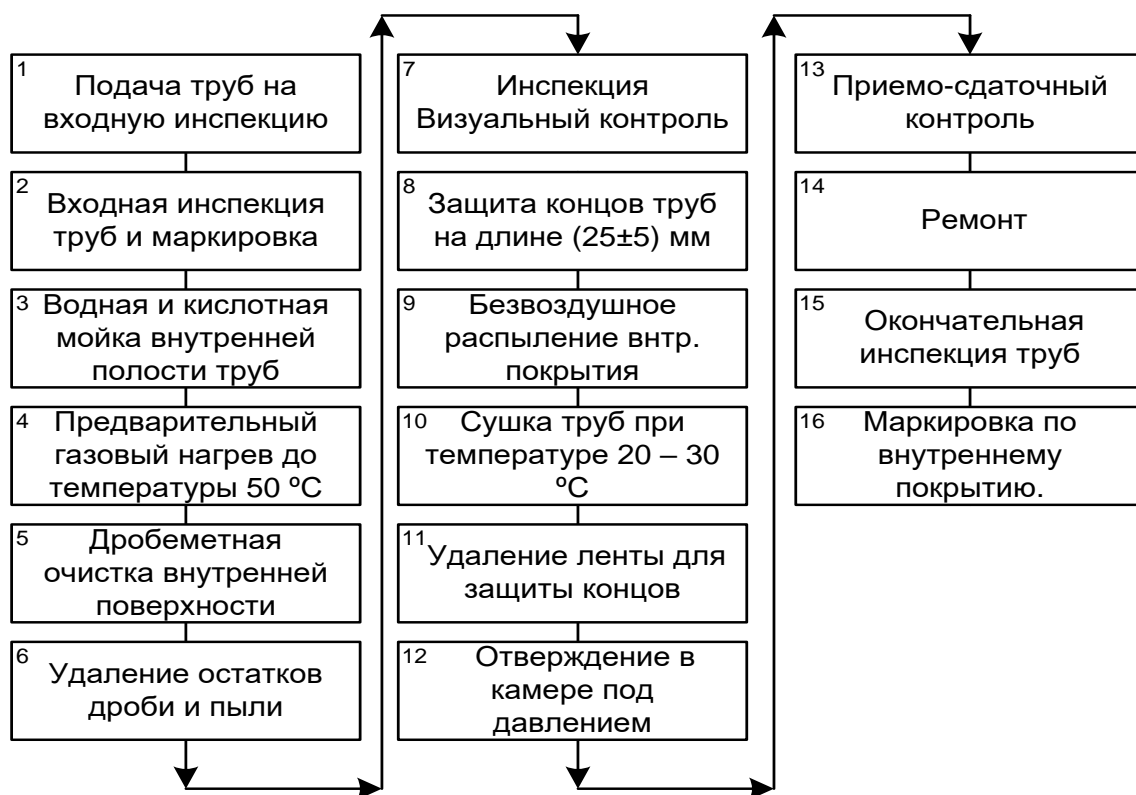


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема технологического процесса нанесения внутреннего покрытия в цехе «Высота 239»

Описание технологического процесса работы передаточной тележки для перемещения труб

Сорок четыре однопозиционных тележек служат для подъема и перемещения трубы с одной технологической станции на другую. В процессе перемещения одной трубы одновременно участвуют две тележки, для обеспечения стабильного положения трубы во время перемещения и уменьшения нагрузки на двигатели.

На технологической линии также установлен конусный конвейер, перемещающий трубы через всю линию наружного и внутреннего покрытия. Большинство транспортных тележек на линии взаимодействуют с конвейером, одна из которых обеспечивает перемещение трубы на ремонтную секцию. Это

означает, что если статус трубы «задержать» или «отремонтировать», то труба забирается с конусного конвейера и выкладывается как можно дальше на стеллаж.

Производительность оборудования для транспортировки труб должна соответствовать производительности линий наружного и внутреннего покрытия.

1.2 Характеристика и кинематическая схема передаточной тележки

Техническое описание и данные по оборудованию



Рисунок 1.3 – Передаточная тележка участка внутреннего покрытия труб цеха «Высота 239»

Тележки для перемещения труб изготавливаются из стального профиля, и состоят из основной рамы и движущихся роликов, крепящихся к сварным поперечным перекладинам.

Ролики устанавливаются на рельсы, чтобы обеспечить движение тележки от одной позиции до другой. К основной раме крепятся подъемный гидроцилиндр и силовая гидроустановка в сборе с функциональными клапанами, встроенным вентилятором охлаждения и переключателями положения цилиндра.

Гидросистема служит для поднятия и опускания трубы в процессе перемещения с одной технологической станции на другую. Состоит из силовой гидроустановки, гидроцилиндра и управляющей аппаратурой. Силовая

гидроустановка соединяется с гидроцилиндром при помощи гибких гидравлических шлангов. Седло для транспортировки труб крепится к верхней секции гидравлического цилиндра с помощью фланца.

Каждая транспортная тележка оснащена электрической панелью управления. Данная панель обеспечивает управление гидросиловым блоком, гидроклапанами, положением цилиндра и мотор-редуктора. Приводной двигатель тележки управляется преобразователем, расположенным на тележке. Также двигатель оснащен внешним электромагнитным тормозом, управляемым преобразователем через реле интерфейса.

Узел «приводной мотор-редуктор» крепится валом к ведомому зубчатому барабану в сборе и обеспечивает перемещение тележки от одной позиции к другой.

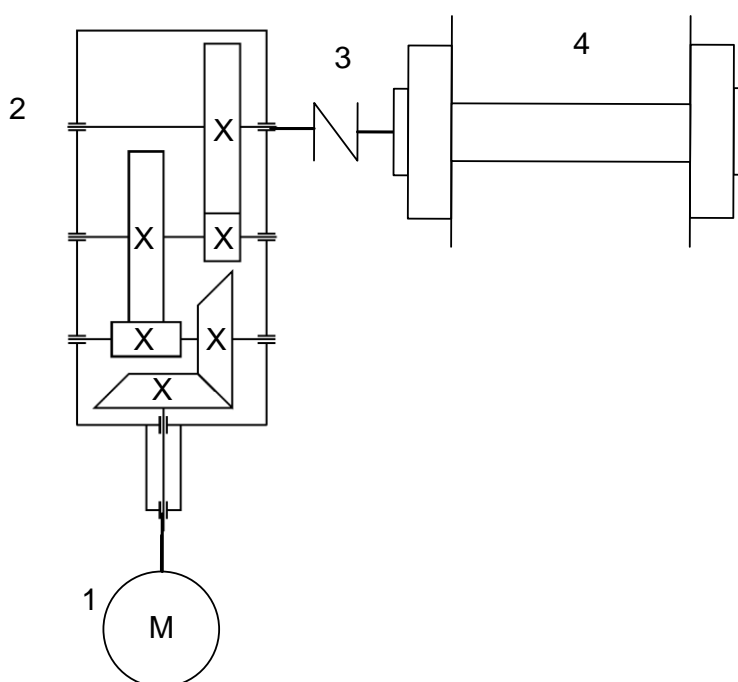


Рисунок 1.4 – Кинематическая схема механизма передвижения передаточной тележки

На рисунке 1.2 кинематической схемы: 1 – двигатель, 2 - конический трехступенчатый редуктор, 3 – жесткая компенсирующая муфта, 4 – колесная пара.

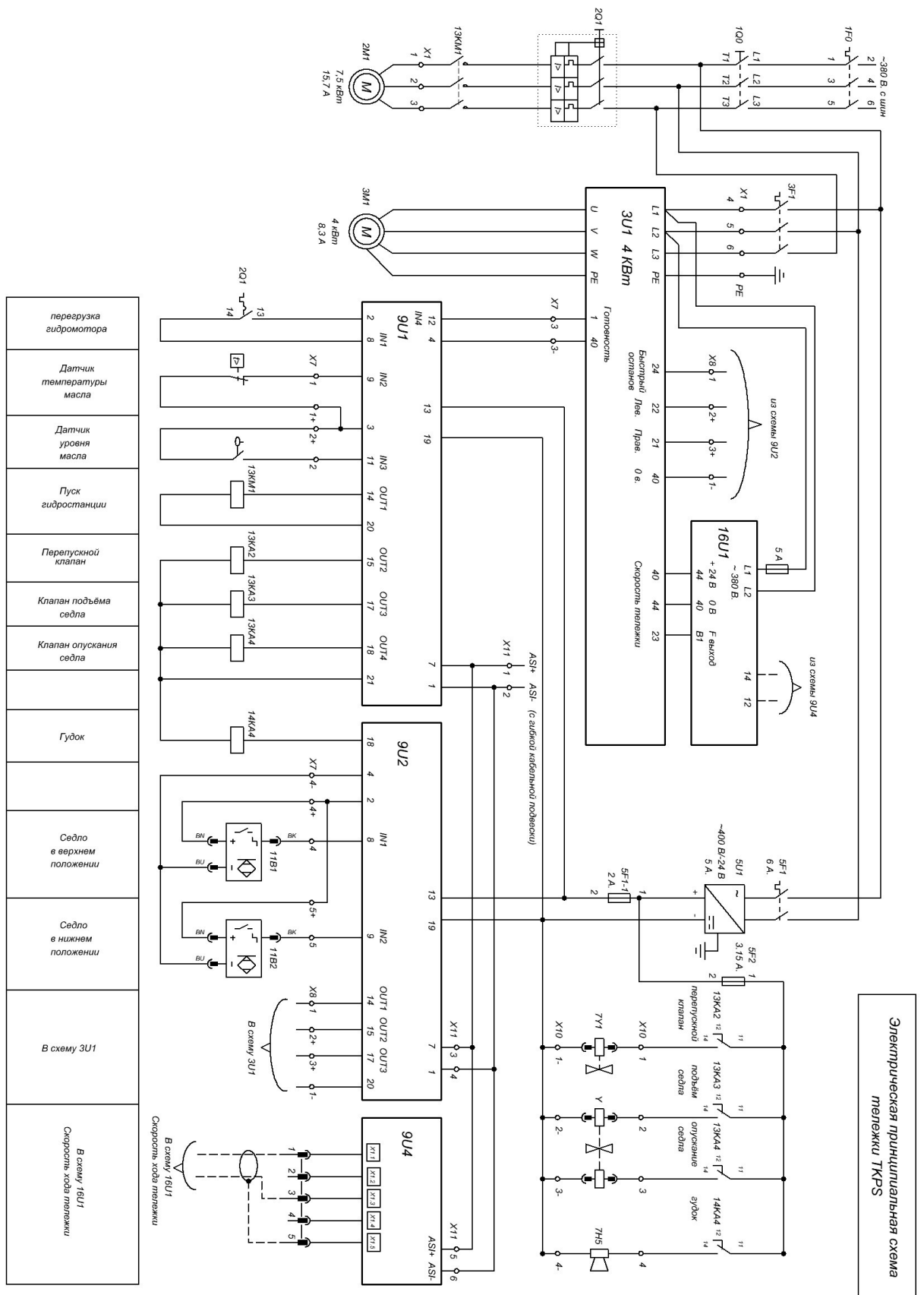


Рисунок 1.5 – Электрическая схема привода перемещения

1.3 Требования к приводу и системе автоматизации передаточной тележки

Передаточная тележка функционирует в пределах непрерывной технологической цепочки и от ее ритмичной работы зависит производительность всей линии. С другой стороны, относительно небольшие размеры рабочей платформы требуют точного центрирования трубы и плавности хода с ограничением рывка. Кроме того, от передаточной тележки требуется точная остановка в заданной позиции. Особо ответственной является операция подъема (опускания) трубы, к которой предъявляются повышенные требования по плавности и надежности.

На основе анализа технологических операций передаточной тележки можно сформулировать следующие требования к приводам мехатронной системы:

- обеспечение диапазона скорости транспортировки 1:10;
- обеспечение остановки тележки в заданной позиции с точностью не менее ± 10 мм;
- обеспечение плавного пуска и торможения при перемещении тележки с ограниченными значениями ускорения на уровне $0,09 \text{ м/с}^2$, при движении с грузом.

Требования к системе автоматизации

Система управления мехатронной системой передаточной тележки должна обеспечивать согласованное управление механизмами системы для выполнения заданных технологических операций. Устройство, реализующее управление мехатронной системой должно обладать достаточным быстродействием для обеспечения функционирования замкнутых контуров регулирования и задания необходимых последовательностей управления. Такими характеристиками обладают микропроцессорные цифровые устройства (контроллеры) с операционными системами «реального времени». Кроме того, устройство управления должно поддерживать необходимые сетевые протоколы для связи с приводами мехатронной системы.

Выделим основные требования:

1) Быстродействие системы на уровне производительности контроллера 0,1 мкс.

2) Величина перерегулирования по положению на уровне 0,01%.

3) Обеспечение перемещения на несколько позиций, в зависимости от сигнала датчика наличия заготовки.

4) Обеспечение управления двух парно эксплуатируемых тележек, с величиной расхождения по положению не более 0,5%.

5) Центральные процессоры CPU 414-3 для построения систем управления средней степени сложности. Для систем автоматизации, в которых необходим большой объем памяти программ и скоростное выполнение инструкций. Встроенный интерфейс PROFINET в CPU 414-3 PN/DP.

6) Цифровая шина PROFINET легко интегрируется в существующую инфраструктуру завода, устраняя необходимость использования дорогостоящих специализированных решений. Так как стандарт полностью основан на Ethernet, в проекте можно свободно совместить проводную и беспроводную связь. Теперь WirelessLAN и Bluetooth можно использовать даже для сбора данных в реальном времени [3]. Ряд преимуществ, для сравнения с другими протоколами, в том числе:

-более гибкий подход к автоматизации управления устройствами;

-высокую скорость работы благодаря связи в реальном времени;

-простую структуру сети для упрощения внедрения и экономичности решений.

7) Обеспечение рекуперативного торможения электродвигателя.

1.4 Выбор системы привода

Систему привода подберём таким образом, чтобы она соответствовала требованиям технологического процесса. Процесс перемещения и поднятия трубы сопровождается нагрузкой на привод в момент поднятия заготовки, перемещения

и разгона тележки. Скорость перемещения зависит от веса заготовки. В разных условиях оператор принимает решение об изменении параметров перемещения в зависимости от потребностей цеха. Чтобы выполнять технологические требования, привод должен обеспечить стабильный процесс перемещения трубы на определённой скорости и удержания не зависимо от нагрузки.

Для перемещения тележки целесообразно использовать асинхронный двигатель, преобразование оборотов которого, достигается путем использования червячного редуктора (двигатель-редуктор). Асинхронный двигатель имеет хорошую характеристику регулирования при больших моментах инерции нагрузки, высокое качество регулирования частоты вращения, что обеспечивает высокую точность, высокую перегрузочную способность и практически полное отсутствие пульсации вращающего момента [4]. Так же критерием выбора асинхронного двигателя стала возможность регулирования скорости от преобразователя частоты и наличие датчика обратной связи.

1.5 Расчет и построение тахограммы и нагрузочной диаграммы привода передвижения передаточной тележки

Тахограмма перемещения передаточной тележки

Технологический процесс предполагает использование двух передаточных тележек одновременно, при параллельном движении нагрузка между ними делится равномерно, механизмы тележек полностью идентичные, поэтому достаточно провести расчет всего одной из них.

Линейная скорость варьируется от 0 до 0,4 м/с. Максимальную линейную скорость с грузом ограничим до 80% в целях повышения устойчивости, скорость составит 0,32 м/с.

Максимальное значение линейного ускорения примем 0,17 м/с² Значение ускорения с трубой 0,09 м/с², значение замедления с трубой 0,09 м/с².

1. Время разгона от 0 до V_H :

Без нагрузки:

$$t_1 = \frac{V_H}{a} = \frac{0,4}{0,17} = 2,353 \text{ с}; \quad (1.1)$$

с нагрузкой:

$$t_{1\text{нагр}} = \frac{V_{H.\text{нагр}}}{a} = \frac{0,32}{0,09} = 3,56 \text{ с.}$$

2. Время торможения со скорости V_H до 0:

$$t_3 = \frac{V_H}{a} = \frac{0,32}{0,09} = 2,353 \text{ с};$$

$$t_{3\text{нагр}} = \frac{V_{H.\text{нагр}}}{a} = \frac{0,4}{0,17} = 3,56 \text{ с.}$$

3. Рассчитаем расстояния, пройденные тележкой за полученные отрезки времени.

Максимальный путь движения тележки составит 23 м, до самого отдаленного свободного ложементов труб.

Путь, пройденный тележкой за время t_1 :

$$L_{t_1} = \frac{a \cdot t^2}{2} = 0,471 \text{ м}; \quad (1.2)$$

$$L_{t_{1\text{нагр}}} = \frac{a_{\text{нагр}} \cdot t_{\text{нагр}}^2}{2} = 0,57 \text{ м.}$$

Путь, пройденный тележкой за время торможения t_3 равен пути ускорения:

$$L_{t1} = L_{t2}.$$

Путь, пройденный тележкой за время движения на номинальной скорости t_2 :

$$L_{t2} = L_{\max} - (L_{t1} + L_{t3}) = 22,058 \text{ м};$$

$$L_{t2\text{нагр}} = L_{\max} - (L_{t1\text{нагр}} + L_{t3\text{нагр}}) = 21,86 \text{ м}.$$

4. Время движения на номинальной скорости V_n :

$$t_2 = \frac{L_{t2}}{V_n} = \frac{22,058}{0,4} = 55,145 \text{ с}; \quad (1.3)$$

$$t_{2\text{нагр}} = \frac{L_{t2\text{нагр}}}{V_{n.\text{нагр}}} = \frac{21,86}{0,32} = 68,3125 \text{ с}.$$

5. Время работы привода

$$T_{\text{общ}} = 59,851 \text{ с};$$

$$T_{\text{общ.нагр}} = 75,4325 \text{ с}.$$

Построим тахограмму движения тележки.

Начале произведем расчет номинальной частоты вращения двигателя для режима движения с грузом и без груза.

Частота вращения двигателя в радианах на секунду находится следующим образом [5]:

$$\omega = \frac{v(t) \cdot i}{R}, \quad (1.4)$$

где $v(t)$ – линейная скорость;

i – передаточное число редуктора;

R – радиус колеса.

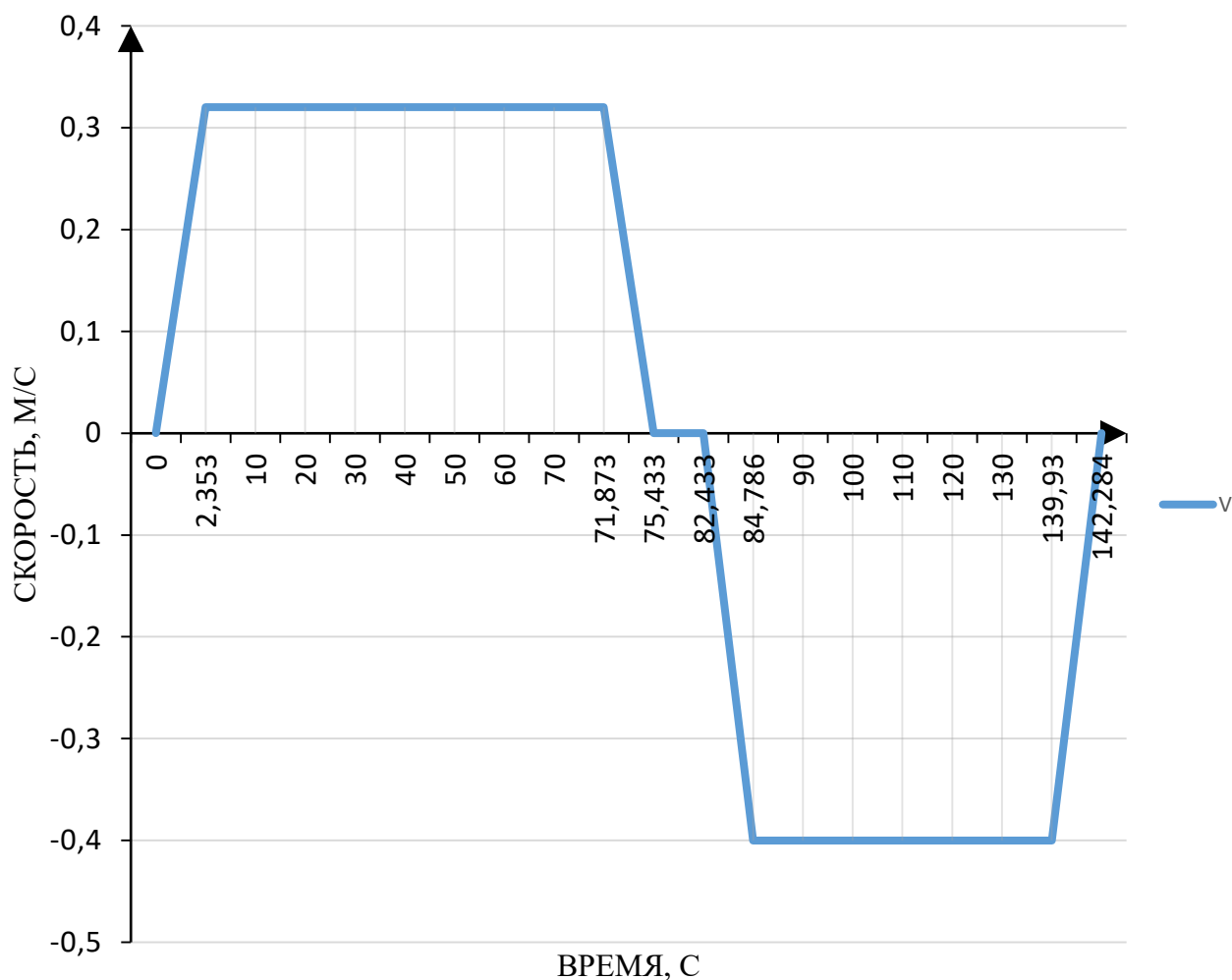


Рисунок 1.6 – Тахограмма движения передаточной тележки

Угловая номинальная скорость двигателя на втором участке:

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{V \cdot i}{R_{\text{кол}}} = \frac{0,4 \cdot 64,08}{0,2} = 128,16 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{дв.н.нагр}} = \frac{V_{\text{нагр}} \cdot i}{R_{\text{кол}}} = \frac{0,32 \cdot 64,08}{0,2} = 102,528 \text{ с}^{-1}.$$

Расчет параметров двигателя

Сила сопротивления качению [5]:

$$F_f = \frac{K_p \cdot m \cdot g (\mu \cdot r_{\text{ц}} + f)}{R_{\text{к}}}, \quad (1.5)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий трение реборд о рельсы, $K_p=1,5$;

m – масса груза $m_{\text{гр}}= 30000$ кг и масса тележки $m_{\text{т}}= 1587$ кг;

μ – коэффициент трения скольжения в подшипниках колес, $\mu=0,005$;

$r_{\text{ц}}$ – радиус цапфы колеса, $r_{\text{ц}}=30$ мм;

f – коэффициент трения качения стали о сталь, $f=0,0015$ [6];

$R_{\text{к}}$ – радиус колеса, $R_{\text{к}}=200$ мм.

При движении с грузом:

$$F_{f_{\text{нагр}}} = \frac{1,5 \cdot (30000 + 1587) \cdot 9,8 (0,005 \cdot 0,03 + 0,0015)}{0,2} = 3830,714 \text{ Н};$$

При движении без груза:

$$F_f = \frac{1,5 \cdot 1587 \cdot 9,8 (0,005 \cdot 0,03 + 0,0015)}{0,2} = 192,5 \text{ Н}.$$

Статическая мощность P_s учитывает все силы, действующие при движении без ускорения [5]. Основные из них:

- сила трения качения;
- силы трения различных элементов;
- сила тяжести на подъемах;
- сила аэродинамического сопротивления.

$$P_s = F \frac{V}{\eta}, \quad (1.6)$$

где η – это общий КПД приводной системы, состоящий из КПД редуктора $\eta_{ред}$ и КПД внешних передающих элементов $\eta_{вн}$.

Цилиндрическая и коническая зубчатая передача.

КПД редуктора с цилиндрическими или коническими шестернями можно принять за $\eta = 0,98$ для каждой ступени [6].

Поскольку на данном этапе расчета редуктор еще не выбран, принимается среднее значение для двух или трехступенчатого редуктора $\eta_{ред} = 0,941$.

КПД нагрузки.

КПД нагрузки зависит от вида передающих элементов после редуктора (например, цепи, ремни, тросы, зубчатые элементы и т. п.).

В нашем случае КПД муфты $\eta_{муф} = 0,98$ [6].

$$\eta = \eta_{муф} \cdot \eta_{ред} = 0,98 \cdot 0,941 = 0,922 \quad (1.7)$$

По формуле 1.6 рассчитываем статическую мощность.

Без груза:

$$P_s = \frac{192,5 \cdot 0,4}{0,922} = 83,514 \text{ Вт.}$$

С грузом:

$$P_{S_{\text{нагр}}} = \frac{3830,714 \cdot 0,32}{0,922} = 1329,53 \text{ Вт.}$$

Динамической называется мощность, расходуемая на ускорение всей системы (нагрузка, передающие элементы, редуктор и двигатель). В нерегулируемых приводах двигатель создает динамический момент, который и ускоряет эту систему. Чем выше этот момент, тем больше ускорение. В общем случае моментом инерции передающих элементов и редуктора можно пренебречь. Момент инерции ротора двигателя не известен, так как его параметры еще не определены. Поэтому мощность двигателя можно лишь приблизительно рассчитать по динамической мощности на ускорение нагрузки. Однако поскольку в приводах обычных транспортных устройств соотношение моментов инерции нагрузки и ротора двигателя очень велико, полная мощность двигателя весьма точно рассчитывается и по уже имеющимся данным [7]. Тем не менее, необходима последующая проверка.

Полная мощность.

Без груза:

$$P = \frac{m \cdot v \cdot a}{\eta} + P_{S_{\text{нагр}}} = \frac{1587 \cdot 0,4 \cdot 0,17}{0,922} + 83,514 = 200,56 \text{ Вт.} \quad (1.8)$$

С грузом:

$$P = \frac{m_{\text{нагр}} \cdot v_{\text{нагр}} \cdot a_{\text{нагр}}}{\eta} + P_{S_{\text{нагр}}} = \frac{31587 \cdot 0,32 \cdot 0,09}{0,922} + 1329,53 = 2316,196 \text{ Вт.}$$

По полученным данным выбирается фирмы производителя NORD «мотор-редуктор» SK 9032.1-112M/4, рассчитанный для повторно-кратковременного режима работы номинальной мощностью $P_n = 4$ кВт, с частотой вращения 1445 об/мин и перегрузочной способностью $\lambda=2,5$, технические данные двигателя представлены в таблице 1.1 [8].

Таблица 1.1 – Параметры двигателя SK 9032.1-112M/4

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВт	P_n	4
Номинальное линейное напряжение статора, В	U_{1n}	380
Номинальная частота вращения, об/мин	N_n	1445
Перегрузочная способность по моменту	λ	2,5
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,74
Номинальный ток, А	I	8,4
Передаточное число редуктора	i	64,08

Предыдущие вычисления проводились без данных двигателя, поэтому необходим подробный проверочный расчет с использованием данных двигателя.

Режим разгона. Внешний момент инерции приведенный к валу двигателя [7]:

$$J_x = 91,2 \cdot m \cdot \left(\frac{v}{n_n}\right)^2 = 91,2 \cdot 31587 \cdot \left(\frac{0,32}{1445}\right)^2 = 0,142 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (1.9)$$

Момент инерции нагруженной мехатронной системы [7]:

$$J = J_{\text{дв}} + \frac{m_{\text{нагр}} \cdot V_{\text{нагр}}^2}{\omega_{\text{н.нагр}}^2}, \quad (1.10)$$

где $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя, $J_{\text{дв}} = 0,0128 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ [8];

$\omega_{\text{дв.н.нагр}}$ – номинальная угловая скорость нагруженной системы, определили по формуле 1.4.

$$J = 0,0128 + \frac{1587 \cdot 0,4^2}{128,16^2} = 0,0283 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{\text{нагр}} = 0,0128 + \frac{31587 \cdot 0,32^2}{102,528^2} = 0,32 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Расчет моментов.

Номинальный момент [7]:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 9550}{n_{\text{н}}} = \frac{4000 \cdot 9550}{1445} = 26,436 \text{ Нм}. \quad (1.11)$$

Статический момент [7]:

$$M_{\text{с.нагр}} = \frac{Ff \cdot V_{\text{нагр}}}{\omega_{\text{н.нагр}} \cdot \eta} = \frac{3830,714 \cdot 0,32}{102,528 \cdot 0,922} = 12,967 \text{ Нм}. \quad (1.12)$$

$$M_{\text{с}} = \frac{Ff \cdot V_{\text{нагр}}}{\omega_{\text{н.нагр}} \cdot \eta} = \frac{192,5 \cdot 0,4}{128,16 \cdot 0,922} = 0,6516 \text{ Нм}.$$

Угловое ускорение.

Движение с грузом [7]:

$$\varepsilon_{\text{нагр}} = \frac{a_{\text{нагр}} \cdot i}{R} = \frac{0,09 \cdot 64,08}{0,2} = 28,836 \text{ с}^{-2}, \quad (1.13)$$

где i – передаточное число редуктора;

R – радиус колеса.

Движение без груза:

$$\varepsilon = \frac{a_{\text{нагр}} \cdot i}{R} = \frac{0,17 \cdot 64,08}{0,2} = 54,468 \text{ с}^{-2}.$$

Динамический момент [7]:

$$M_{\text{д}} = J \cdot \varepsilon = 1,54 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (1.14)$$

$$M_{\text{д,нагр}} = J_{\text{нагр}} \cdot \varepsilon = 9,23 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Нагрузочная диаграмма перемещения передаточной тележки

Из основного уравнения движения электропривода [4]:

$$M = \sum M_{\text{с}} + \sum M_{\text{дин}}. \quad (1.15)$$

Рассчитаем полный момент для всех участков движения:

1) На первом участке, при ускорении, $a = 0,09 \text{ м/с}^2$:

$$M_1 = 12,967 + 0,32 \cdot \frac{0,09 \cdot 64,08}{0,2} = 22,197 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2) На третьем участке, при замедлении, $a = 0,09 \text{ м/с}^2$:

$$M_3 = 12,967 - 9,23 = 3,737 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3) На втором участке: $M_2 = 12,967 \text{ Н}\cdot\text{м}.$

4) На четвертом участке, при ускорении, $a = 0,17 \text{ м/с}^2$:

$$M_4 = 0,6516 + 0,0283 \cdot \frac{0,17 \cdot 64,08}{0,2} = 2,1916 \text{ Нм.}$$

5) На шестом участке, при замедлении, $a = 0,17 \text{ м/с}^2$:

$$M_3 = 0,6516 - 1,54 = -0,8884 \text{ Нм.}$$

6) На пятом участке: $M_5 = 0,6516 \text{ Нм.}$

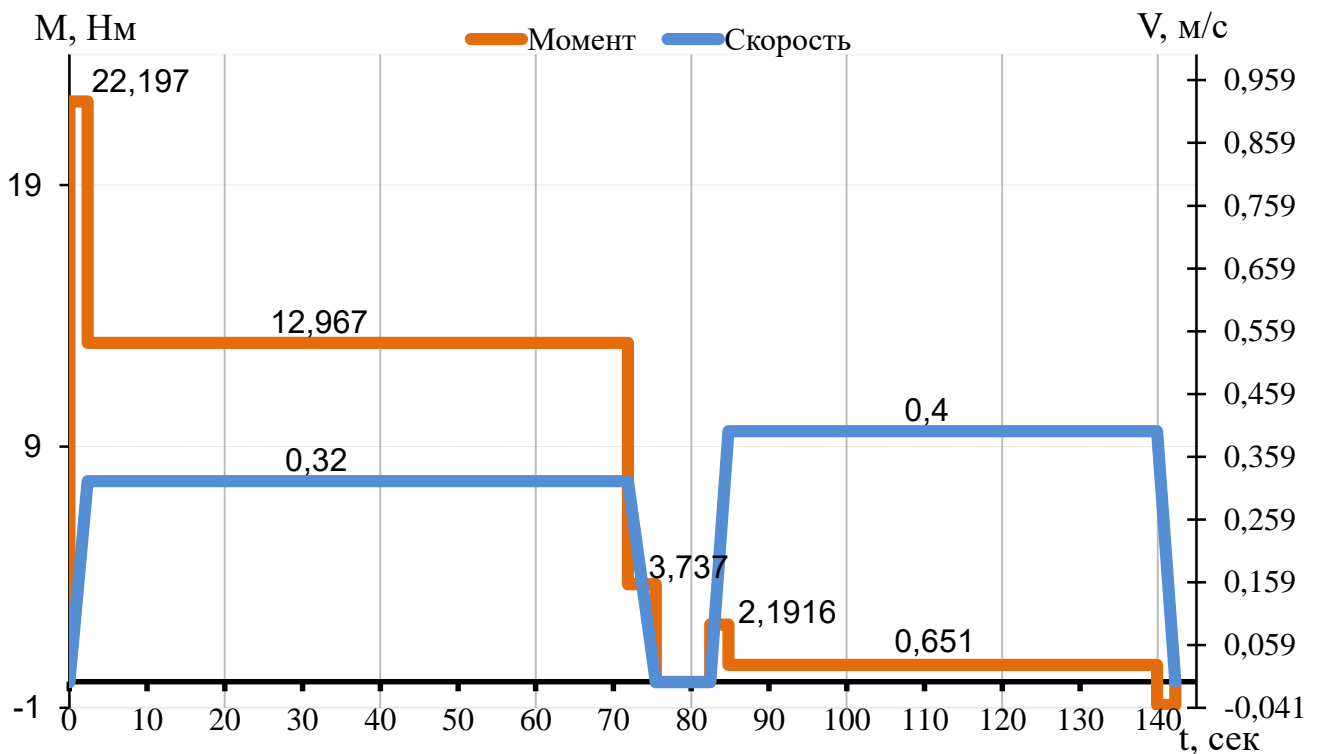


Рисунок 1.8 – Нагрузочная диаграмма и тахограмма привода перемещения мехатронной системы

1.6 Проверка двигателя по условиям нагрева и перегрузки

Двигатель по условию нагрева будем осуществлять на основе метода эквивалентного момента [7].

$$M_э = M_{эф} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{ф}}{\varepsilon_{ст}}}, \quad (1.16)$$

где $M_э$ – эквивалентный момент, при стандартном значении продолжительности включения $\varepsilon_{ст}$, на которое выбран двигатель;

$M_{эф}$ – фактический эквивалентный момент, который рассчитывается по формуле 1.17 [7]:

$$M_{эф} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0}} =$$

$$= \sqrt{\frac{22,179^2 \cdot 2,353 + 12,967^2 \cdot 68,313 + 3,737^2 \cdot 2,353}{2,353 + 68,313 + 2,353 + 314}} = 5,73 \text{ Нм}, \quad (1.17)$$

где M_1, M_2, \dots, M_n – значения моментов на отдельных участках нагрузочных диаграмм; t_1, t_2, t_3 – время этих участков.

Определим фактическую продолжительность включения по формуле 1.18 [7]:

$$\varepsilon_{ф} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} = 0,189. \quad (1.18)$$

Стандартная продолжительность включения $\varepsilon_{ст}$ выбирается ближайшая к фактической. В нашем случае это 0,15 [9]. Тогда, произведем расчет согласно формуле 1.18:

$$M_э = M_{эф} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{ф}}{\varepsilon_{ст}}} = 5,73 \cdot \sqrt{\frac{0,189}{0,15}} = 6,43 \text{ Нм}.$$

Двигатель проходит по нагреву, если справедливо неравенство 1.19 [7]:

$$M_3 < M_H, \quad (1.19)$$

где M_H – номинальный момент выбранного двигателя.

$$6,43 < 26,436.$$

Отсюда можно сделать вывод, что неравенство 1.19 удовлетворено и двигатель проходит проверку по нагреву. После проверки двигателя на нагрев его проверяют на перегрузку [7]:

$$M_{\max} \leq \lambda \cdot M_H, \quad (1.20)$$

где M_{\max} , λ – максимальное значение момента в нагрузочной диаграмме и коэффициент перегрузки соответственно.

$$22,197 \leq 2,5 \cdot 26,436.$$

Согласно расчетам, можно сказать, что проверка двигателя на перегрузку удовлетворяет условию неравенства 1.20 и двигатель выбран правильно.

1.7 Выбор преобразователя частоты

Правильно подобранный преобразователь частоты (ПЧ) обеспечит надежную работу электродвигателя и системы управления, а также позволит рационально использовать электроэнергию. Преобразователь частоты способен эффективно регулировать частоту вращения электродвигателя, изменяя частоту питающего напряжения, а также задавать ток и напряжение.

Для выбора конкретной модели ПЧ необходимо исходить из задач, возложенных на электропривод, среди которых точность позиционирования, диапазон скоростей, номинальная скорость, а также тип подключаемого двигателя. Также можно учитывать конструктивные особенности преобразователя, такие как размеры, необходимая степень защиты (IP), возможность выноса пульта управления и прочее.

Ключевым фактором для выбора преобразователя частоты является номинальная мощность электропривода и ток, потребляемый двигателем. Для обеспечения высокого пускового момента или большом ускорении и замедлении, необходимо выбирать ПЧ на порядок мощнее, с учетом перегрузочной способности. Номинальный длительный ток преобразователя должен быть больше (равен) фактического длительного тока, потребляемого двигателем [10].

Преобразователь частоты также позволяет ограничить пусковые токи двигателя, которые при подключении напрямую могут достигать семикратных значений от номинальных. Преобразователь же позволяет ограничить токи на уровне номинальных или фактически потребляемых двигателем [10].

В нашем случае ПЧ работает с одним двигателем, скорость которого плавно должна регулироваться. Исходя из принципа, в котором коэффициент перегрузочной способности преобразователя $\lambda_{\text{п}}$ должен быть меньше коэффициента перегрузочной способности двигателя $\lambda_{\text{д}}$.

Выберем преобразователь частоты [10]:

$$I_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{д}}}{\lambda_{\text{п}}} \cdot I_{\text{д}}, \quad (1.21)$$

где $I_{\text{п}}$ - номинальный ток преобразователя;

$I_{\text{д}}$ - номинальный ток двигателя равный 8,4 А;

$\lambda_{\text{д}}$ - перегрузочная способность двигателя равная 2,5;

$\lambda_{\text{п}}$ - перегрузочная способность преобразователя.

Исходя из паспортных данных двигателя и режима работы привода, отметим наиболее подходящий частотный преобразователь модели Siemens sinamics g120d, с силовым модулем 6SL3525-0PE25-5AA1. Серия преобразователей частоты SINAMICS G120D – это решение для специальных задач приводов в области подъёмно-транспортного оборудования [11].

Преобразователь является децентрализованным, что позволяет непосредственно подключать исполнительный механизм. Также имеется поддержка шины Profinet, что позволит легко интегрировать ПЧ в существующую систему управления. Выбранный преобразователь также обеспечивает еще одно из требований к электроприводу, сформулированных в начале работы: рекуперация электроэнергии в сеть. Характеристики приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры преобразователя частоты

Наименование параметра	Величина
Типоразмер	FSC
Питающее напряжение, В	380
Номинальная мощность, кВт	4
Номинальный выходной ток, А	10,2
Входной ток, А	9,5
Рабочая температура, °С	от –10 до +40

Состав силовой части преобразователя частоты

Схема содержит два обратимых преобразователя напряжения (ОПН). ОПН1 на стороне сети в основном работает в выпрямительном режиме (активный выпрямитель напряжения), когда энергия из сети через второй ОПН, работающий в инверторном режиме (автономный инвертор напряжения), передается к двигателю. При торможении АИН, подключенный к двигателю переходит в выпрямительный режим, а АВН, подключенный к сети, в инверторный режим. При этом происходит рекуперация энергии в сеть. Если задать схеме управления на входе $\cos\varphi = \pm 1$, то во всех режимах при

регулировании и торможении двигателя из сети будет потребляться или в сеть будет отдаваться практически только активная мощность, а ток будет практически синусоидален, что определяет минимальное вредное влияние на питающую сеть. В состав силовой части преобразователя частоты входят следующие основные элементы, некоторые из которых не указаны на упрощенной схеме [12]:

- главный автоматический выключатель, для защиты кабелей и полупроводниковых приборов;
- главный контактор со стороны питания;
- сетевой фильтр;
- выпрямительный блок (АВН), представляющий собой обратимый преобразователь напряжения на IGBT транзисторах, управляемый по методу широтно-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающий передачу энергии от питающей сети к сети постоянного тока и наоборот [12];
- индуктивно-емкостный фильтр $L_0 C_0$ звена постоянного тока с блоком предварительной зарядки конденсаторов;
- трехфазный мостовой инвертор напряжения (АИН), выполненный на базе шестиключевого IGBT-модуля, управляемого также по методу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [12];
- выходной фильтр (du/dt-фильтр).

Упрощенная принципиальная электрическая схема силовой части электропривода механизма передаточной тележки представлена на рисунке 1.9.

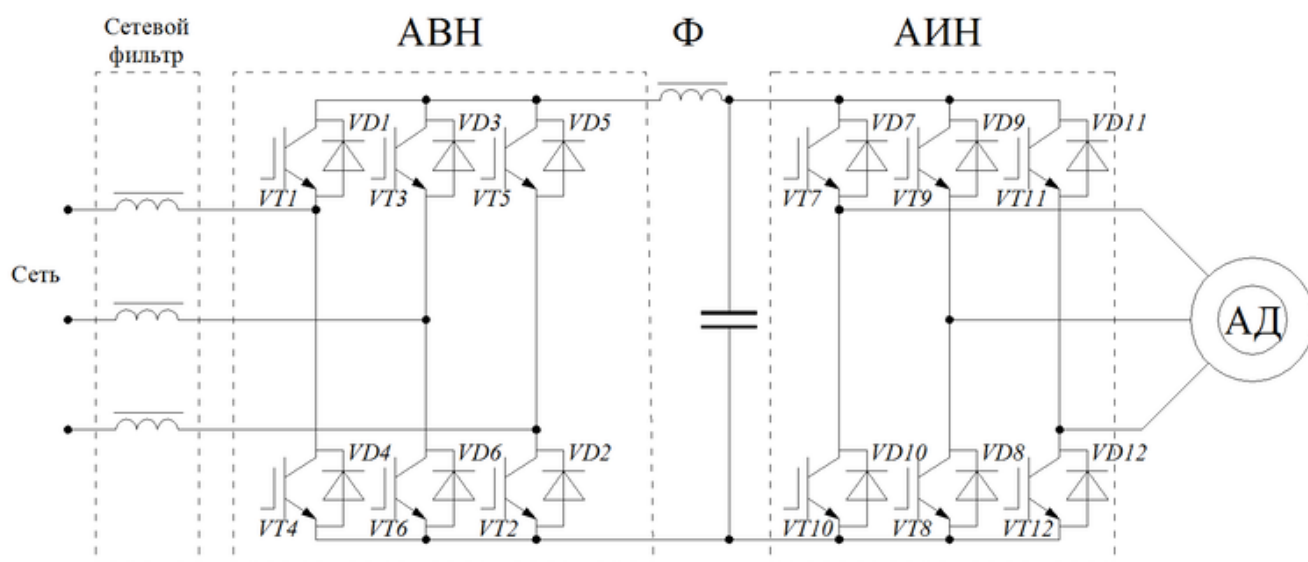


Рисунок 1.9 – Упрощенная принципиальная схема силовой части привода передвижения передаточной тележки

Инновационная коммутационная техника обеспечивает сокращение высших гармоник. Сетевой дроссель не нужен. Это экономит место и расходы на проектирование и приобретение. Основное назначение сетевых дросселей заключается в уменьшении больших бросков тока и, таким образом, гармоник сетевого тока [11]. Нет необходимости также и в выходном дросселе, так как ПЧ подключен напрямую к двигателю, выходной дроссель на выходе ПЧ, ограничивает токи заряда/разряда кабелей, соединяющих ПЧ и АД, таким образом, возможна работа при более больших расстояниях между преобразователем и двигателем (длина кабеля от 50 до 1000 м) [12].

Основным источником промышленных радиопомех при работе преобразователя частоты являются переключающиеся с высокой скоростью IGBT-транзисторы. Генерируемые ими радиопомехи характеризуются высоким уровнем и широким спектром частот - от единиц килогерц до десятков мегагерц. Пути распространения помех самые разнообразные: провода, межвитковые емкости трансформаторов, паразитные емкости между землей и корпусами [12].

Без использования дополнительных узлов или устройств уровень радиопомех значительно превосходит допустимый. Для подавления подобных помех, в первую очередь, служат сетевые помехоподавляющие фильтры, включаемые

между сетью и преобразователем (сетевой фильтр на рисунке 1.9). Поскольку они должны пропускать ток относительно низкой промышленной частоты и не пропускать высокочастотные токи помех, они обычно представляют собой заградительный фильтр высоких частот. Таким образом, помехоподавляющие фильтры, совместно с коммутационными сетевыми дросселями, уменьшают напряжение помехи преобразователей. В комплект ПЧ входит сетевой помехоподавляющий фильтр типа 6SE7031- 8ES87-0FA0, обеспечивающий снижение уровня радиопомех [11].

1.8 Защиты привода. Расчет уставок защитных устройств

Виды аварийных режимов и способы их предотвращения

Надежно спроектированным привод можно считать только после того, как проработаны защиты в случае возникновения внештатных ситуаций и аварийных режимов работы.

Защита разрабатывается как для предотвращения повреждения оборудования, так и для защиты персонала.

Характер повреждений определяет вид и параметры защитных устройств, существует несколько основных видов защит для электропривода.

1) Защита от коротких замыканий отключает питание в цепи при появлении в силовой части или в цепи управления токов короткого замыкания.

Существует несколько различных устройств, созданных для размыкания цепи, при возникновении короткого замыкания. Среди них: плавкие предохранители, электромагнитные реле, автоматические выключатели с электромагнитным расцеплением. Действие этих устройств происходит практически без временной выдержки.

2) Защита от перегрузки предохраняет двигатель от недопустимого перегрева, в частности и при сравнительно небольших по величине, но продолжительных тепловых перегрузках. Защита от перегрузки должна применяться только для

электродвигателей тех рабочих механизмов, у которых возможны ненормальные увеличения нагрузки при нарушениях рабочего процесса.

Защита двигателя привода передвижения передаточной тележки

К двигателю следует применить защитные действия в случае возникновения неполадок в работе. Функцию аварийного выключения выполняет автоматический выключатель, в нашем случае целесообразно установить именно его.

Автоматический выключатель (АВ) выбирают по номинальному току $I_{н.вык}$ выключателя и номинальному току $I_{н.расц}$ расцепителя. И рассчитывают по формуле 1.22 [7]:

$$I_{н.расц} = \frac{I_{дл}}{K_m} = \frac{8,4}{1} = 8,4 \text{ А} \quad (1.22)$$

где $I_{дл} = I_n$ – длительный ток в линии;

I_n – номинальный ток двигателя;

K_m – тепловой коэффициент, учитывающий условия установки АВ;

$K_T = 1$ - для установки в открытом исполнении; $K_T = 0,85$ – для установки в закрытых шкафах.

Из каталога автоматических выключателей выберем наиболее подходящий автомат Siemens 3RV2021-4BA10 с характеристикой $I_{н.выкл} = 13.. 20 \text{ А}$ [13].

Тогда должно выполняться условие [7]:

$$I_{мгн.ср} \geq K \cdot I_{кр}, \quad (1.23)$$

где $K = 1,4$ – коэффициент, учитывающий неточность определения $I_{кр}$ в линии;

$I_{кр}$ - максимальный кратковременный ток;

$I_{мгн.ср}$ – ток мгновенного срабатывания.

$$I_{кр} = K_i \cdot I_N, \quad (1.24)$$

где K_i – коэффициент перегрузки для пускового тока.

Проверка:

$$I_{МГН.ср} = 10 \cdot I_{расц} = 10 \cdot 13 = 130 \text{ A};$$

$$I_{кр} = K_i \cdot I_N = 7 \cdot 8,4 = 58,8 \text{ A};$$

$$130 \geq 1,4 \cdot 58,8;$$

$$130 \geq 82,32.$$

Неравенство выполняется, значит автоматический выключатель выбран правильно.



Рисунок 1.10 - Автоматический выключатель Siemens 3RV2021-4BA10

2 СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации

Чтобы реализовать автоматическое управление конкретным приводным механизмом, нужно использовать систему автоматизации. Разработаем архитектуру системы автоматизации для электропривода, обеспечивающего синхронизированное движение двух передаточных тележек. В ходе технологического процесса труба должна перемещаться между станциями участка. Требованиями к электроприводу будут являться диапазон возможных скоростей перемещения и точность положения (регулирования по координате перемещения x). Эту задачу выполняют контроллер, частотный преобразователь, встроенный в приводной двигатель, а также датчики положения (дальномеры).

Двигатель NordSK 112M/4 BRE60 HLTFTI4 4 kW выполнен в сочетании с трёхступенчатым коническо-цилиндрическим редуктором. Питается двигатель от преобразователя частоты Siemens sinamics g120d.

В иерархии системы управления верхний уровень занимает система MES (Manufacturing Execution System). Эта система выполняет упорядоченную обработку информации о ходе изготовления продукции в различных цехах предприятия, обеспечивает управление качеством и предоставляет в реальном времени необходимую информацию для следующих уровней управления предприятием [3].

Серверы технологических данных и автоматизированные рабочие места операторов технологического оборудования образуют SCADA-системы, верхний уровень АСУ ТП. SCADA – аббревиатура от английского Supervisory Control and Data Acquisition, что переводится как «сбор данных и диспетчерское управление». Серверы обеспечивают работу SCADA-системы, поддерживая протокол обмена данными с технологическими устройствами (контроллерами, интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами) и протокол работы с сетью персональных компьютеров [3].

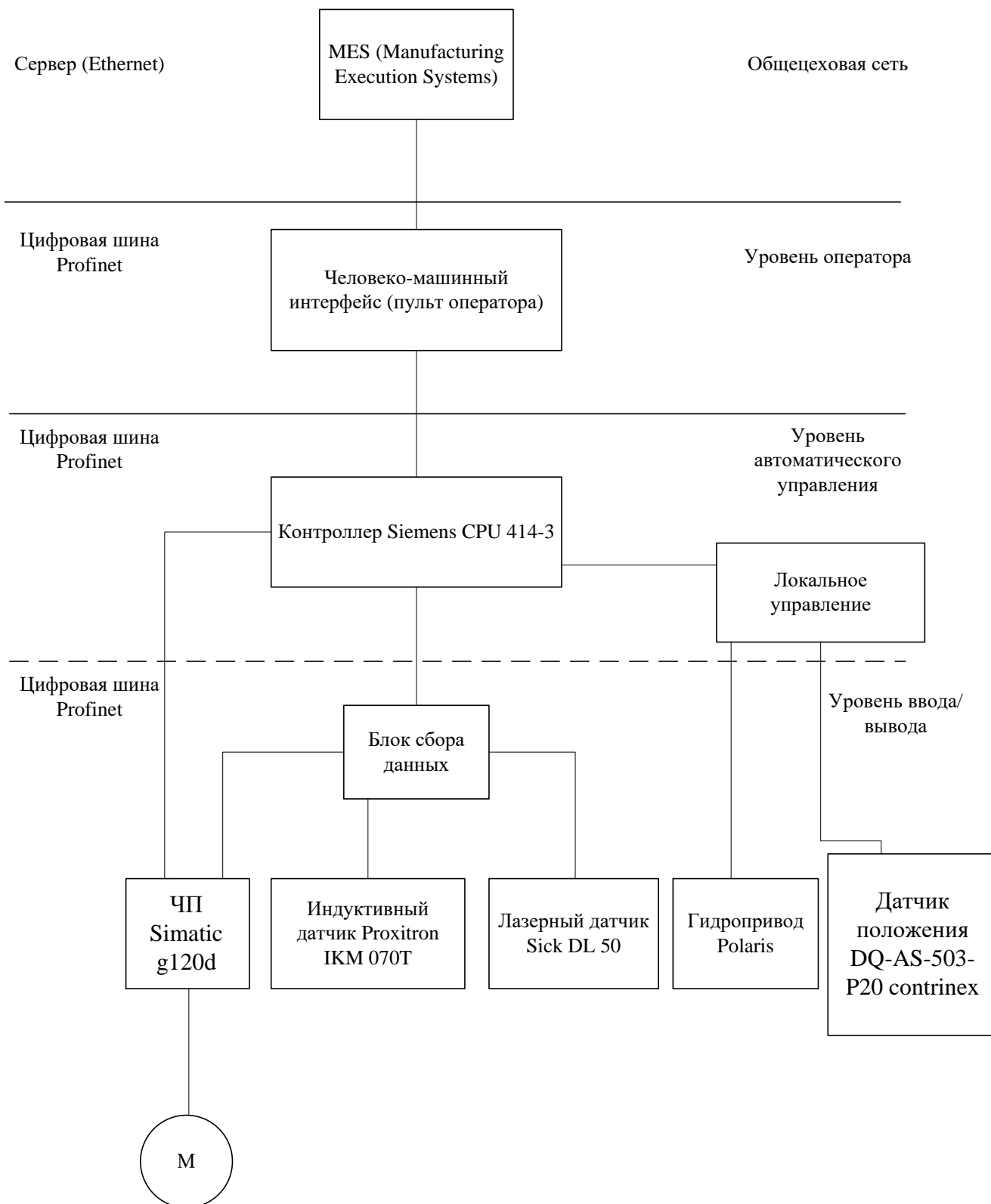


Рисунок 2.1 – Архитектура системы автоматизации.

2.2 Выбор контроллера для реализации автоматического управления электроприводом транспортной тележки.

Для реализации системы управления потребуется сам микроконтроллер, а также дополнительное оборудование и материалы, в виде датчиков, станций сбора данных и шинпровода.

Выбор микроконтроллера обусловлен требованиями к системе управления:

- 1) Быстродействие системы на уровне производительности 0,1 мкс.
- 2) Центральные процессоры для построения систем управления средней степени сложности. Для систем автоматизации, в которых необходим большой объем памяти программ и скоростное выполнение инструкций.

3) Цифровая шина PROFINET

Для успешной реализации системы управления выберем контроллер SIMATIC S7-400H фирмы «Siemens».

Контроллер SIMATIC S7-400H с центральным процессором CPU 414-3, который является программируемым логическим контроллером, предназначенным для управления технологическим процессом в промышленном производстве с помощью распределенной системы модулей ввода-вывода. ПЛК управляет вводом сигналов, снимаемых с датчиков, обрабатывает полученные данные в соответствии с пользовательской программой, и выводит рассчитанные величины на исполнительные устройства. Ввод сигналов и вывод управляющих величин производится через модули ввода-вывода [14].

Характеризуются следующими показателями:

- Высокопроизводительный процессор: время выполнения двоичных операций не превышает 0.045 мкс.
- Быстродействующее RAM для выполнения секций программы пользователя: CPU 414-3: 2.8 Мбайт (по 1.4 Мбайт для программ и данных).
- Гибкое расширение: до 131072 дискретных и до 8192 аналоговых входов-выходов.

- **МРІ интерфейс:** встроенный МРІ интерфейс позволяет создавать простейшие сетевые решения с подключением до 32 станций и скоростью обмена данными до 12 Мбит/с. Одновременная поддержка до 32 соединений с МРІ станциями или станциями, подключенными к внутренней коммуникационной шине (С-шине) контроллера.

- **Переключатель режимов работы:** для выбора режимов работы центрального процессора.

- **Диагностический буфер:** кольцевой, для сохранения 120 последних сообщений об ошибках, отказах и прерываниях. Эта информация может считываться для анализа диагностической информации. Размер буфера может изменяться.

- **Часы реального времени:** диагностические сообщения центрального процессора снабжаются отметками даты и времени.

- **Карта памяти:** для увеличения объема встроенной загружаемой памяти (512 Кбайт, RAM). Допускается использование карт памяти RAM или EPROM. В этой области памяти сохраняется программа S7-400 и все необходимые для ее выполнения данные.

- **Встроенные интерфейсы PROFINET DP:** позволяют создавать распределенные структуры систем ввода-вывода с высокой скоростью обмена данными. Конфигурирование и обслуживание входов и выходов систем локального и распределенного ввода-вывода выполняется одними и теми же способами.

Допускается построение смешанных конфигураций PROFINET, отвечающих требованиям стандарта IEC 61158/EN 50170, и включающих в свой состав контроллеры SIMATIC S5, работающие под управлением ведущего устройства SIMATIC S7.

Программируемый контроллер SIMATIC S7-400H разработан для построения систем автоматического управления, отличающихся повышенной надежностью функционирования. Наличие резервированной структуры позволяет продолжать работу в случае возникновения одного или нескольких отказов в его компонентах.

Как правило, такие системы управляют производствами, простой которых вызывает большие экономические потери [14].

Конструкция контроллера

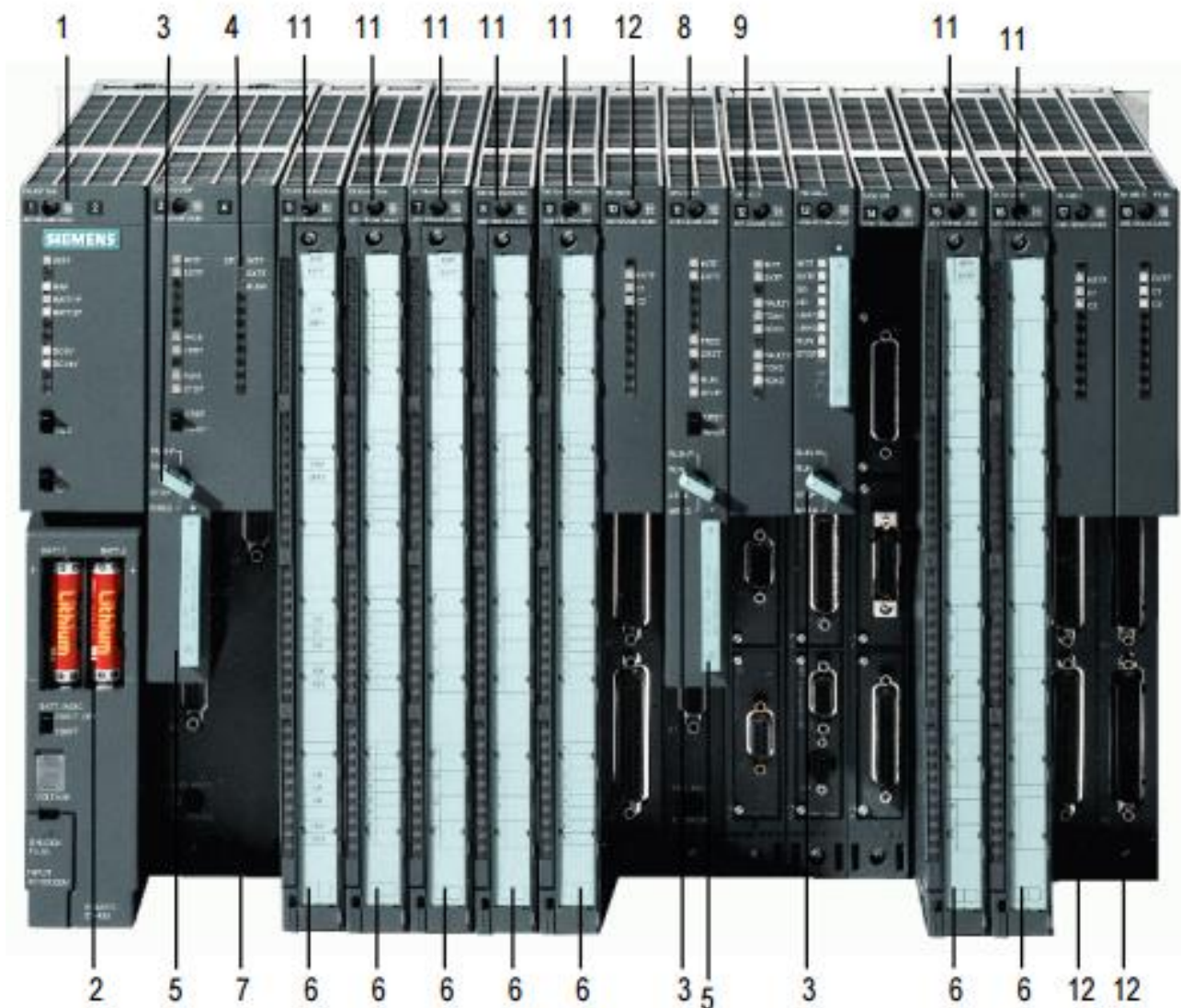


Рисунок 2.2 – Конструкция контроллера

Описание компонентов ПЛК:

1. Модуль блока питания.
2. Буферная батарея.
3. Ключ выбора режимов работы центрального процессора.
4. Светодиоды индикации состояний и отказов.
5. Карта памяти.
6. Защитные дверцы фронтальных соединителей с маркировкой

внешних цепей. 7. Центральный процессор №1. 8. Центральный процессор №2. 9. Модуль FM 456-4 (семейство M7). 10. Модуль расширения M7. 11. Модули ввода-вывода. 12. Интерфейсные модули.

Система автоматизации S7-400 имеет модульную конструкцию. Она может комплектоваться широким спектром модулей, устанавливаемых в монтажных стойках в любом порядке. Система включает в свой состав:

- Модули блоков питания (PS): используются для подключения SIMATIC S7-400 к источникам питания =24/ 48/ 60/ 120/ 230В или ~120/ 230В.

- Модули центральных процессоров (CPU): в составе контроллера могут использоваться центральные процессоры различной производительности. Все центральные процессоры оснащены встроенными интерфейсами PROFIBUS-DP. При необходимости, в базовом блоке контроллера может быть использовано до 4 центральных процессоров.

- Сигнальные модули (SM): для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов.

- Коммуникационные модули (CP): для организации последовательной передачи данных по PtP интерфейсу, а также сетевого обмена данными.

- Функциональные модули (FM): для решения специальных задач управления, к которым можно отнести счет, позиционирование, автоматическое регулирование.

2.3 Выбор датчиков для реализации автоматического управления электроприводом транспортной тележки

Выбор датчиков положения

Наиболее распространены бесконтактные датчики положения следующих типов: индуктивные, генераторные, магнитогерконовые и фотоэлектронные. Указанные датчики не имеют механического контакта с подвижным объектом, положение которого контролируется.

Бесконтактные датчики положения обеспечивают высокое быстродействие и большую частоту включений механизма. Определенным недостатком этих датчиков является зависимость их точности от изменения напряжения питания и температуры. В зависимости от требований, выходным аппаратом этих устройств может быть, как бесконтактный логический элемент, так и электрическое реле.

В схемах точной остановки электроприводов, бесконтактные датчики могут использоваться как для подачи команды на переход к пониженной частоте вращения, так и для окончательной остановки, в данном случае индуктивный датчик подает сигнал о наличии трубы на позиции.

Индуктивные датчики положения ProxitronIKM 070T [15].

Работа этих датчиков основана на принципе изменения индуктивного сопротивления катушек со стальным сердечником при изменении воздушного зазора в магнитной цепи.

- Расстояние срабатывания 100 мм.
- Температура окружающей среды до +100°C.
- Напряжение питания 20 - 260 В.

Ø 163 mm

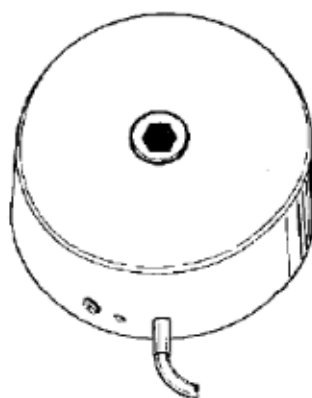


Рисунок 2.3 – Индуктивный датчик положения ProxitronIKM 070T.

Лазерный датчик расстояния

Для точного регулирования по положению, при реализации системы управления потребуется лазерный дальномер, который будет установлен вне передаточной тележки и направлен на специальную светоотражающую поверхность тележки, тем самым измеряя расстояние до нее. В качестве датчика расстояния подойдет лазерный дальномер Sick DL50 [16].

Лазерные датчики средних расстояний DL50 компании Sick обеспечивают точное и надежное сканирование на малых расстояниях независимо от цвета и фактуры поверхности, что позволяет использовать их в различных промышленных приложениях. SICK DL50 отличаются простотой установки, программирования и запуска в эксплуатацию, имеют хорошее сочетание цены и качества. К ключевым особенностям датчиков DL50 относятся: высокая производительность, надежность и устойчивость к засветкам, диапазон сканирования до 50 м.



Рисунок 2.4 – Лазерный датчик расстояния Sick DL50.

Технические характеристики:

- Режим измерений: 200 ... 50000 мм. Время отклика: 15 мм, 30 мс.
- Повторяемость: 2 мм, 3 мм.

2.4 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода передаточной тележки.

Объектом регулирования является привод транспортной тележки, предназначенной для перемещения труб между технологическими станциями линии внутреннего покрытия.

Задачей автоматического регулирования является:

- поддержание скорости перемещения транспортной тележки, установленной регламентом производственного процесса, диапазон скоростей 1:10;
- осуществление рекуперативного торможения;
- обеспечение остановки тележки в заданной позиции с точностью не менее ± 10 мм;
- обеспечение плавного пуска и торможения при перемещении тележки с ограниченными значениями ускорения на уровне $0,09 \text{ м/с}^2$, при движении с грузом.

Система имеет два одинаковых привода с однозонными системами регулирования скорости с внутренним контуром тока и внешним контуром положения. Контур скорости настраивается на модульный оптимум (П-регулятор скорости) [19].

Внутренний контур содержит РТ- регулятор тока, формирующий воздействие на объект управления, ДТ – датчик тока на двигателе. Внешний контур состоит из ДП – датчика положения, РП – регулятора положения и задатчика интенсивности – ЗИС. Объектом управления является АД – асинхронный двигатель с ПЧ – преобразователем частоты. Внешний контур регулирования положения является общим для обеих систем привода. С целью учета перемещения обеих тележек обратная связь этого контура реализована по полусумме перемещений первой S1 и второй S2 тележек.

$$U_{\text{оп}} = \frac{S1+S2}{2}. \quad (2.1)$$

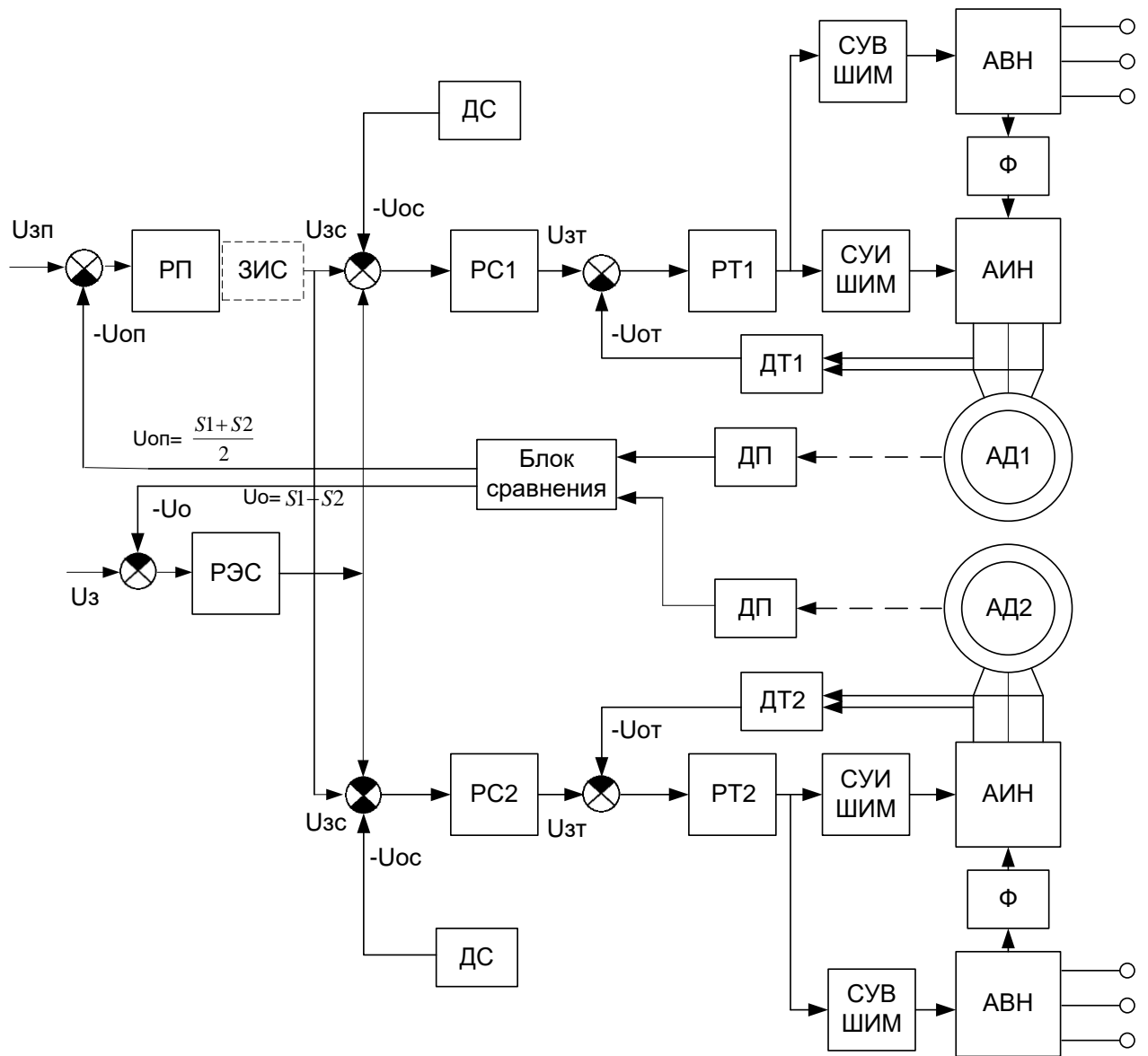


Рисунок 2.5 – Функциональная схема привода перемещения передаточной тележки.

Согласно технологическим особенностям работы контур регулирования положения обрабатывает в основном “большие перемещения”, но для более точного позиционирования и обработки “малых перемещений”, будем использовать нелинейный регулятор положения РП, характеристика которого приведена на рис. 2.6 [20].

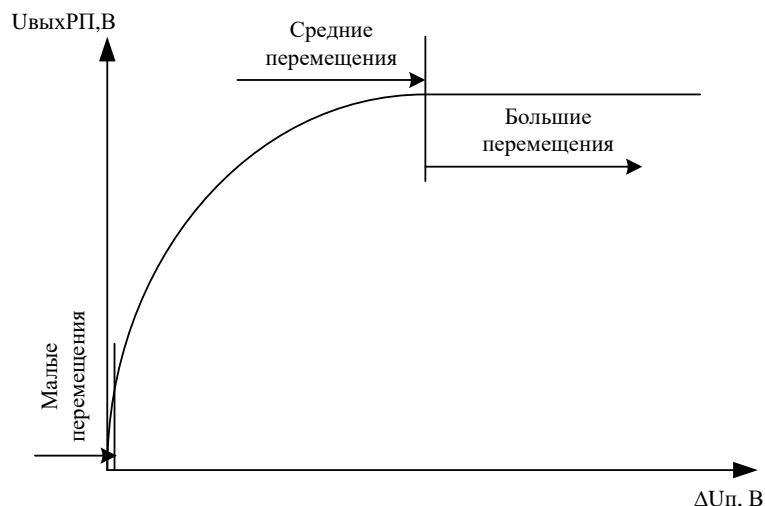


Рисунок 2.6 – Характеристика регулятора положения

Кроме того, в общую часть системы управления введен регулятор электрической синхронизации РЭС, на входе которого сигнал задания на перекося трубы U_3 сравнивается с сигналом обратной связи, пропорциональным разности перемещений тележек [20].

$$U_o = S1 - S2. \quad (2.2)$$

Сигнал с выхода РЭС в качестве корректирующего воздействия подается на входы регуляторов скорости, причем на вход РС2 (нижнего по схеме) этот сигнал подается в инверсном виде. Наличие этого контура регулирования позволяет, при проскальзывании одной из тележек на месте, обеспечивать электрическую синхронизацию работы электроприводов и не допускать перекося трубы в пространстве.

Особенностью работы контура электрической синхронизации является принципиальная возможность возникновения небольших рассогласований положения первой и второй тележек, т.е. контуром обрабатываются только “малые перемещения”.

2.5 Разработка контура регулирования технологических координат

Регулятором технологических координат в данной системе является регулятор положения. В технологическом процессе передаточная тележка должна обеспечивать перемещение трубы на ложементы, которые находятся на разном удалении от начальной точки (конусного конвейера). При наличии сигнала о наличии трубы на ложементе, тележка не может переместить трубу на эту позицию, соответственно перемещает трубу на ближайший свободный ложемент. Обратная связь в данном технологическом контуре будет осуществляться с индуктивных датчиков наличия трубы. Система должна автоматически определить расстояние, на которое нужно переместить тележку, основываясь на сигналах с занятых ложементов, с помощью датчиков положения тележки (лазерных датчиков положения).

2.6 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

Для управления движением исполнительных органов рабочих машин и производственных механизмов и обеспечения требуемых режимов самого электропривода необходимо регулирование ряда переменных, например, скорости, ускорения рабочей машины, токов в цепях двигателя, момента на их валу и многое другое. Кроме этого, и при работе самого электропривода необходимо обеспечить определенные допустимые режимы работы его элементов. Процесс регулирования этих и других координат всегда связан с целенаправленным воздействием на двигатель, что и должна обеспечить система управления [18].

Упрощенная структурная схема системы автоматического регулирования (САР) АД приведена на рис. 2.7.

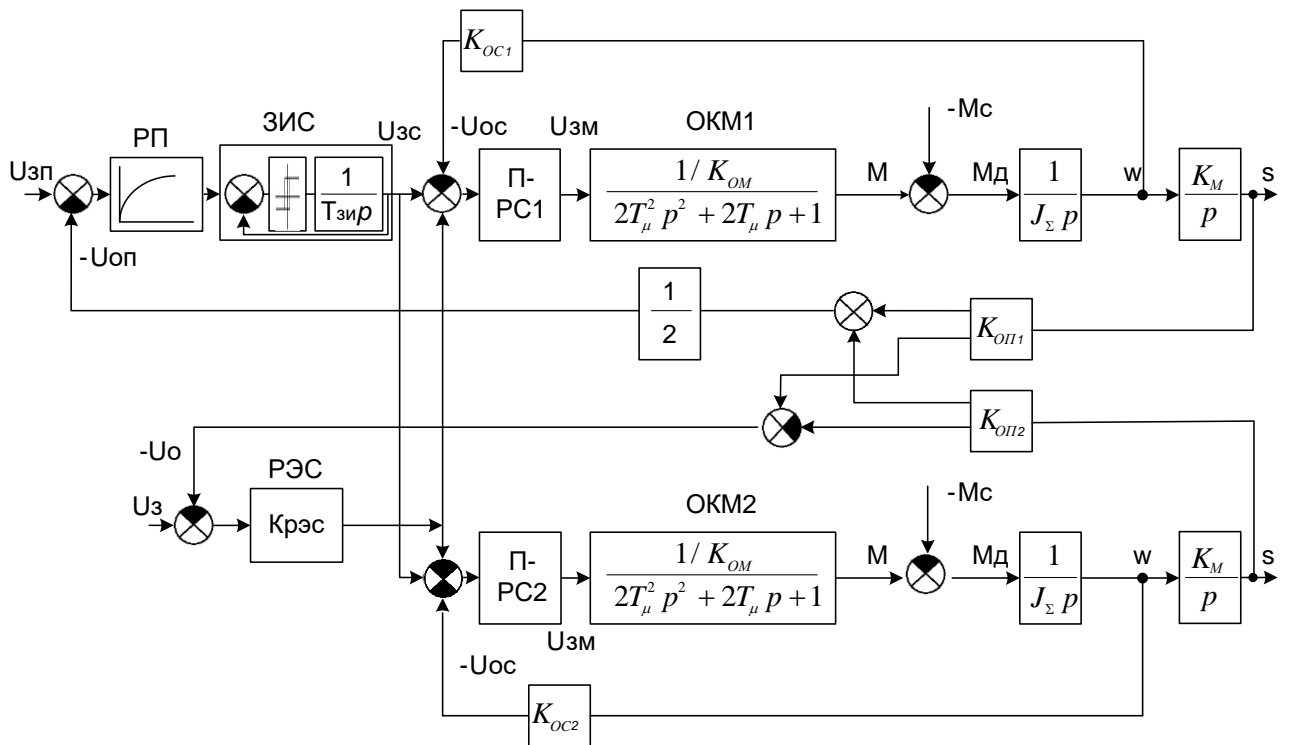


Рисунок 2.7 – Упрощенная структурная схема регулирования по положению АД

Система автоматического регулирования состоит из внутреннего оптимизированного контура регулирования момента (ОКМ), включающий в себя три блока [18]:

1. Преобразователь частоты (с наименьшей постоянной времени T_μ).
2. Статорная цепь АД с сопротивлением обмотки статора R_s и электромагнитной постоянной времени $T_{эс}$.
3. Регулятор момента, который настраивается на модульный оптимум (компенсация электромагнитной постоянной времени T_s).

На рис. 2.8 вышеперечисленные элементы приведены в виде аппроксимированного оптимизированного контура момента (АОКМ). В этом случае он представляет собой колебательное звено с временными характеристиками, соответствующими настройке на модульный оптимум.

Наименьшей постоянной времени T_μ обладает преобразователь частоты, так как он является наиболее быстродействующим исполнительным элементом в

системе «ПЧ-АД». Значение малой некомпенсируемой постоянной времени лежит в пределах [18]:

$$T_{\mu} = 0,01 \div 0,05.$$

Коэффициент обратной связи по моменту $K_{ом}$ рассчитывается по формуле [20]:

$$K_{ом} = \frac{U_{y.max}}{M_{max} \cdot \lambda} = \frac{10}{22,197 \cdot 2,5} = 0,18, \quad (2.3)$$

где $U_{y.max}$ – максимальное напряжение управления;

M_{max} – максимальный момент двигателя.

В теории автоматического управления, ввиду малости постоянной времени T_{μ} , допускается проводить аппроксимацию внутреннего оптимизированного контура, в этом случае он примет вид, как показано на рис. 2.8 [20].

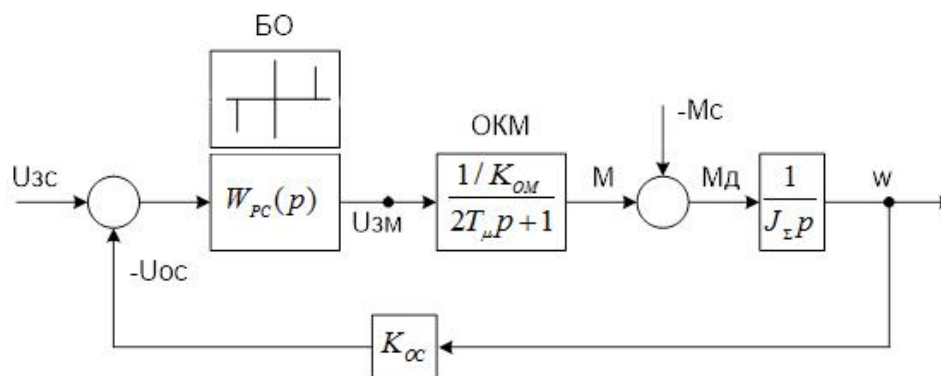


Рисунок 2.8 – Упрощенная структурная схема регулирования моментом и скоростью АД с аппроксимированным внутренним ОКМ

Определим параметры контура регулирования скорости в случае аппроксимированного ОК.

Контур регулирования скорости состоит из П-РС и обратной связи по скорости.

Коэффициент передачи РС определяется по выражению [20]:

$$K_{PC} = \frac{K_{ом} \cdot J_{\Sigma}}{4T_{\mu} \cdot K_{ос}} = \frac{0,18 \cdot 0,32}{4 \cdot 0,01 \cdot 0,09753} = 14,765, \quad (2.4)$$

где $K_{ом}$ – коэффициент обратной связи по моменту;

$K_{ос}$ – коэффициент обратной связи по скорости;

J_{Σ} – суммарный момент инерции.

Коэффициент обратной связи по скорости рассчитывается по формуле [20]:

$$K_{ос} = \frac{U_{ос}}{\omega_{max}} = \frac{10}{102,528} = 0,09753. \quad (2.5)$$

Согласно технологическим особенностям работы контур регулирования положения (РП) отрабатывает в большей степени “большие перемещения”. Для улучшения динамики в системе применяется нелинейный регулятор положения РП, учитывающий, как “большие перемещения”, так и “средние перемещения”, и “малые перемещения” [20].

При отработке малых перемещений (выходы регуляторов скорости и положения не входят в зону насыщения) коэффициент усиления РП принимается равным [20]:

$$W_{РП.М} = \frac{U_{зс}}{U_{зп} - U_{оп}} = \frac{K_{ос}}{8 \cdot K_{оп} \cdot T_{\mu} \cdot K_{М}}, \quad (2.6)$$

где $K_{М}$ – коэффициент преобразования угловой скорости двигателя в линейную скорость перемещения, учитывающий передаточное число всей кинематической схемы.

$$K_M = \frac{V_H}{\omega_H} = 0,00312.$$

Коэффициент обратной связи по положению рассчитывается по формуле [20]:

$$K_{оп} = \frac{U_{ос}}{S_{max}} = \frac{10}{23} = 0,435. \quad (2.5)$$

При обработке “средних перемещений” сигнал задания на ток (с выхода регулятора скорости РС) ограничивается блоком ограничения БО и с целью обеспечения разгона с заданным ускорением выходное напряжение регулятора положения должно быть связано с сигналом ошибки (сигналом на входе регулятора) следующим выражением [20]:

$$U_{зс} = K_{ос} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon \cdot (U_{зп} - U_{оп})}{K_{оп} \cdot K_M}}, \quad (2.6)$$

где ε – угловое ускорение.

При этом коэффициент усиления РП составит [20]:

$$W_{РП,С} = \frac{U_{зс}}{U_{зп} - U_{оп}} = K_{ос} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon}{K_{оп} \cdot K_M \cdot (U_{зп} - U_{оп})}}. \quad (2.7)$$

Разница между сигналом задания положения $U_{зп}$ и обратной связи $U_{оп}$ рассчитывается во времени [20]:

$$\Delta U_{П}(t) = K_{оп} \cdot \frac{K_M \cdot \varepsilon \cdot t^2}{2}. \quad (2.8)$$

При обработке “больших перемещений” в насыщении находится регулятор положения. В этом случае сигнал на его выходе ограничивается максимально допустимой скоростью перемещения [20]:

$$U_{зс} = U_{МАХ} \cdot$$

По полученным формулам построим нелинейную характеристику РП:

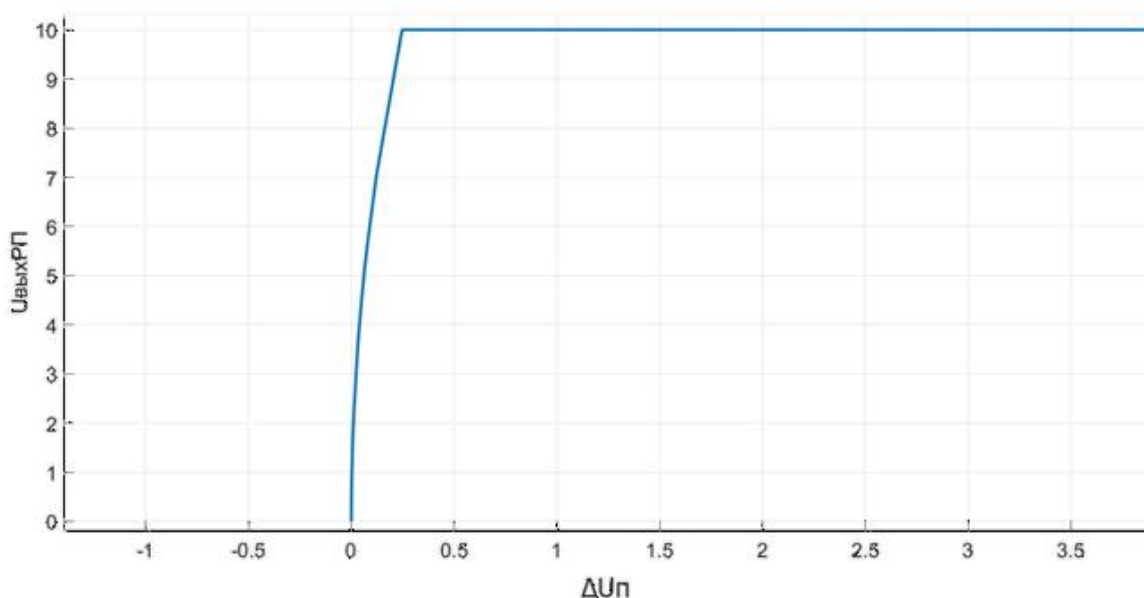


Рисунок 2.9 – Нелинейная характеристика регулятора положения

Смоделируем подробную структурную схему в Matlab. Моделирование будем производить в прикладном пакете Simulink, используя блоки основных элементов, среди которых блоки передаточных функций transfer fnc, блоки формирования сигнала signal builder. Передаточная функция регулятора положения (РП) реализована с помощью блока lookup table, в виде нелинейной характеристики (рис. 2.9). Для реализации контура технологических координат используем управляемый ключ (multiport switch), так при наличии сигнала с ложемента, ключ переключается в положение равное количеству сигналов. При максимальном значении (все ложемента заняты) передаточная тележка не перемещается.

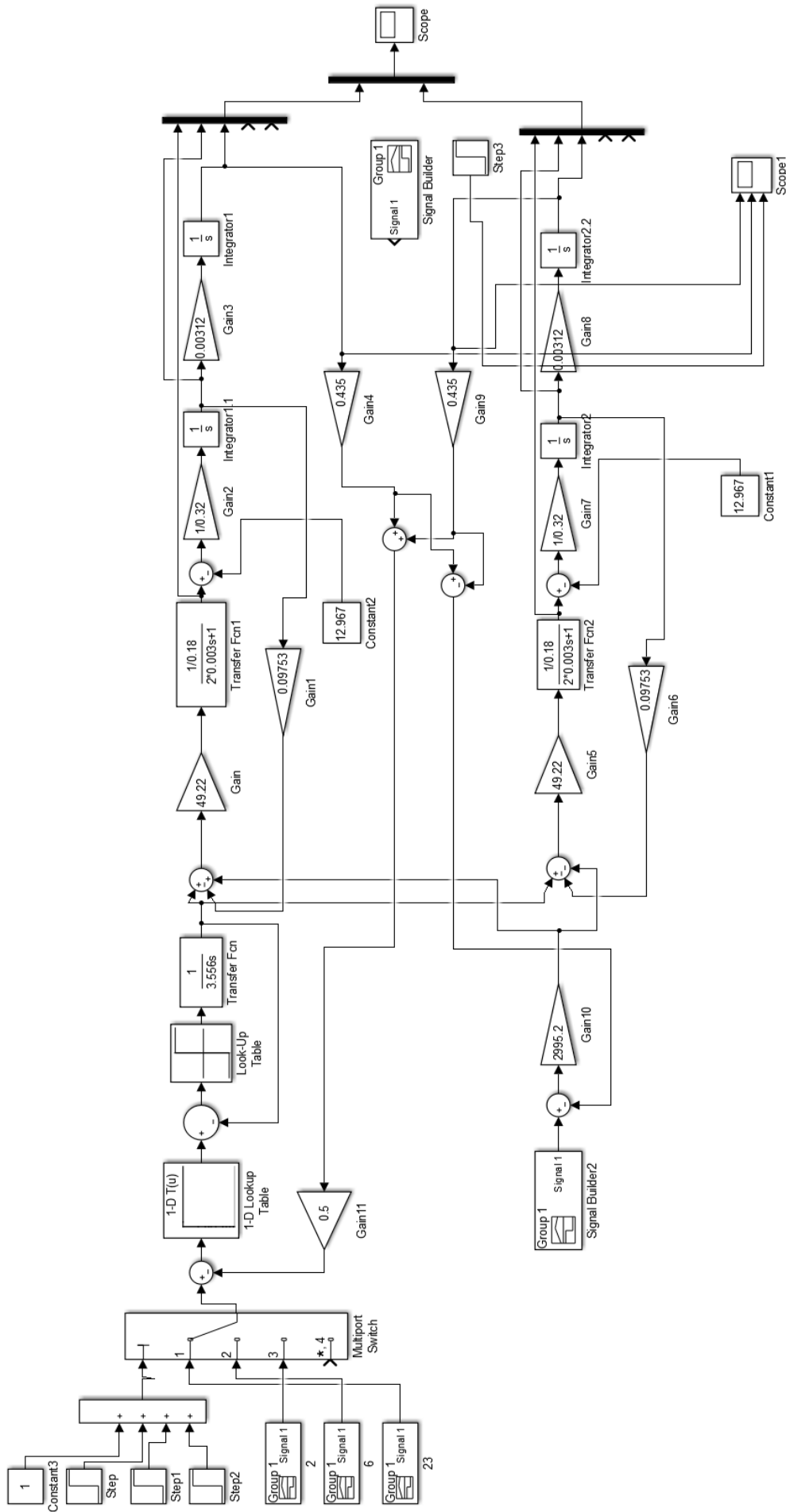


Рисунок 2.10 – Математическая модель системы управления приводом перемещения передающей тележки

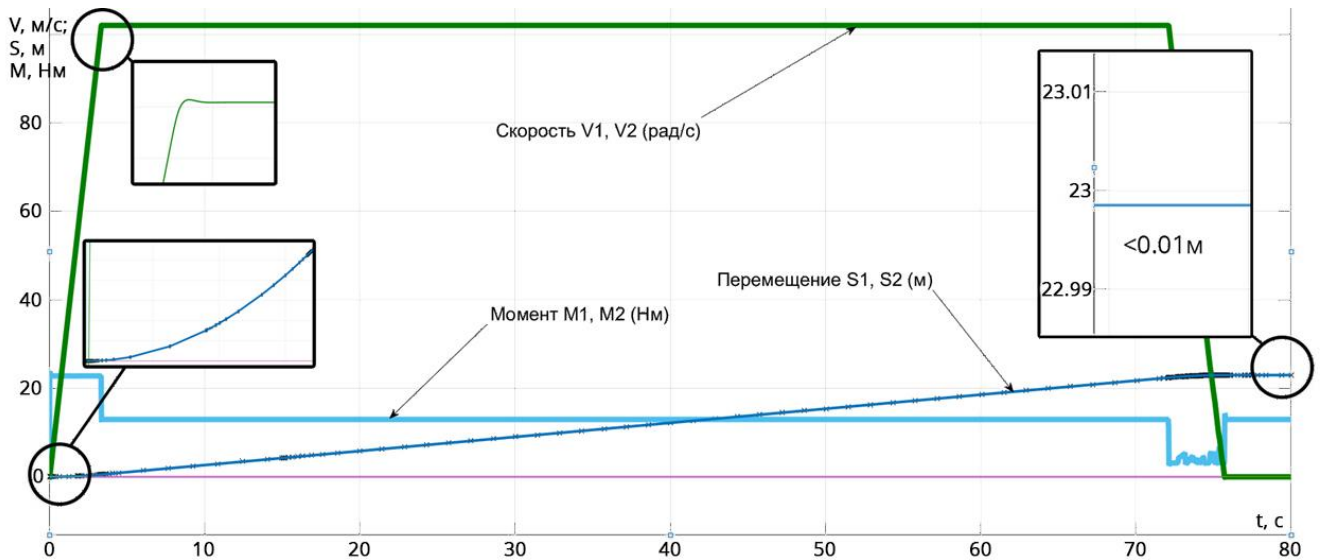


Рисунок 2.11 – Отработка перемещения на расстояние 23 м двумя передаточными тележками

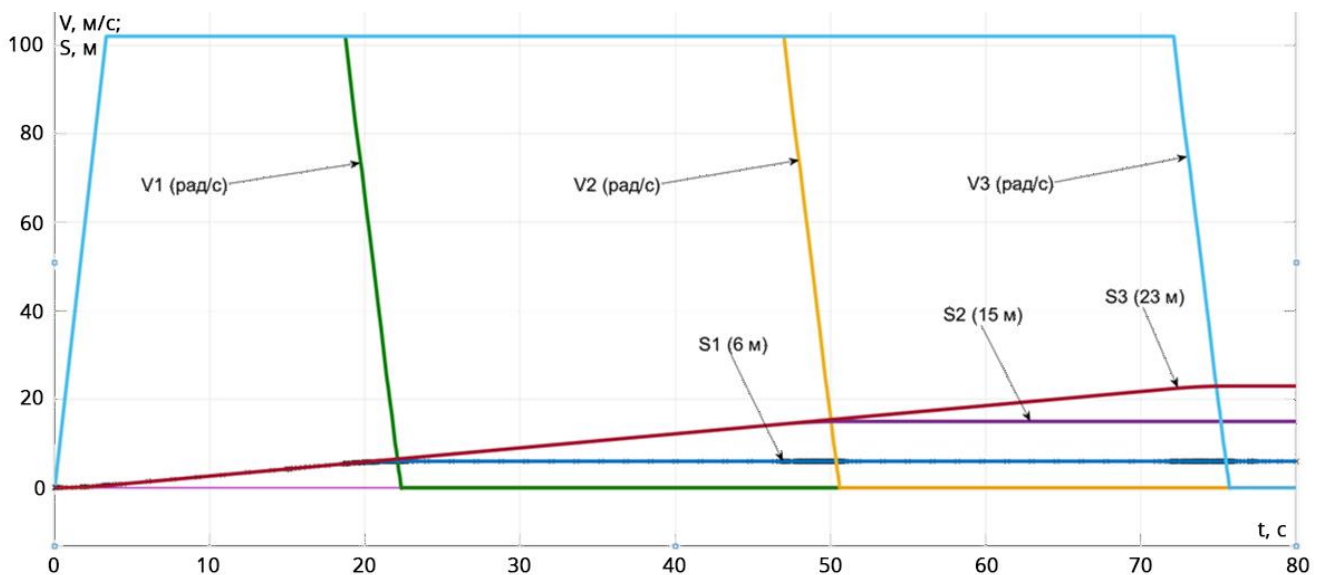


Рисунок 2.12 – Перемещение на расстояния 6 м, 15 м, 23 м

Для того чтобы проверить работоспособность регулятора электрической синхронизации (РЭС) введем в обратную связь по положению второй тележки задержку сигнала на 15 секунде движения, величина задержки не должна превышать диапазона сигналов для малых перемещений, возьмем 0,0001 В.

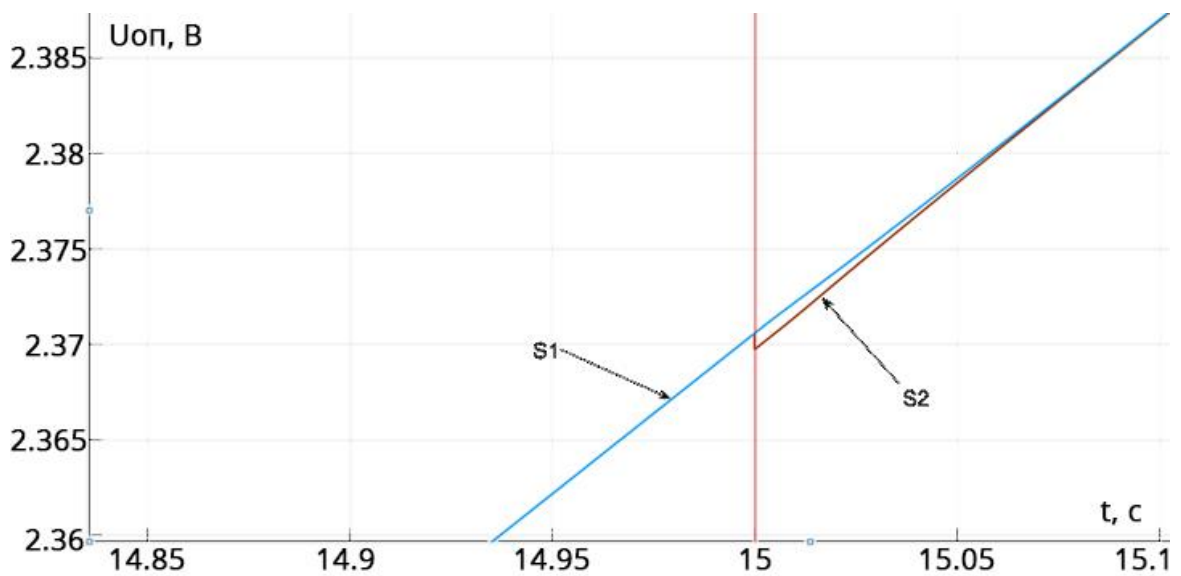


Рисунок 2.13 – Задержка по времени сигнала S2

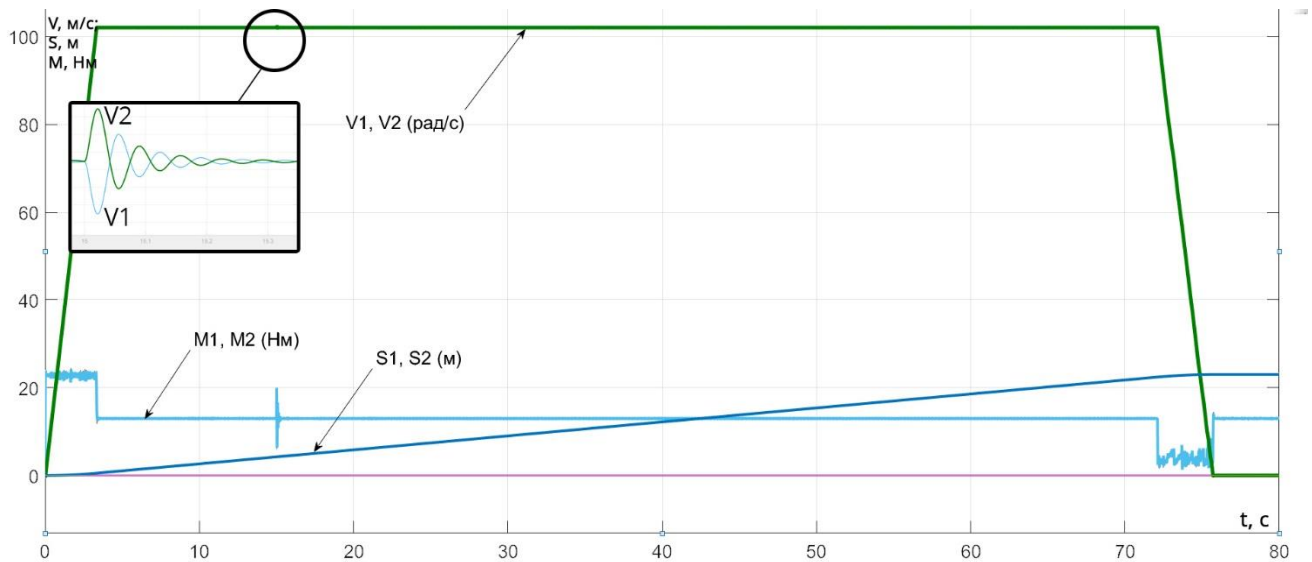


Рисунок 2.14 – Отработка регулятора синхронизации при задержке сигнала обратной связи одной из тележек

При исследовании графиков можно сделать вывод, что они аналогичны тахограмме и нагрузочной диаграмме исследуемого механизма и дают возможность изучить показатели качества переходных процессов. Величина перерегулирования графика положения равна 0.006%, величина расхождения по положению двух тележек не превышает 0,5%, что удовлетворяет требованиям, предъявляемых к приводу.

3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Расчет производственной программы цеха

Расчет производственной программы цеха начинается с составления баланса времени работы оборудования.

Производительность транспортной передаточной тележки для участка внутреннего покрытия труб должна соответствовать производительности линии внутреннего покрытия труб и линии наружного покрытия труб, так как передаточная тележка задействована в технологических процессах обеих линий.

Календарным временем считается нахождение оборудования в эксплуатации, независимо от ремонтов и простоев. В прошлом году T_k составило 321 день.

Номинальный фонд рабочего времени T_n учитывает время простоев и ремонта оборудования. Эффективный фонд рабочего времени отличается от календарного, с учетом простоев и фактического времени работы оборудования, обусловленного технологическим процессом [21].

Таблица 3.1 – Баланс времени работы оборудования

Простой, суточный			Время использования оборудования		Текущий простой		Годовой фонд рабочего времени, час.	Эффект. Фонд времени Тэф
Празд. дни	Капит. ремонт	Планов. ремонт	Дни	Часы	Часы	%		
11	10	23	321	7704	1001	13	6703	3193

Расчет производительности оборудования на линии внутреннего покрытия, в зависимости от сортамента труб.

Таблица 3.2 – Расчет производительности оборудования

Линия внутреннего покрытия					
Толщина стенки, мм	Длина трубы, м	Объем работ, тыс. тонн	Трубы/ч	м2/ч	Расчетная производительность, ч
15	12.2	59,940	13,8	750	687
19	12.2	74,924	13,8	750	680
26	12.2	119,880	13,8	750	799
33	12.2	29,962	13,8	750	158
40	12.2	17,520	13,8	750	77
15	18.3	17,482	9,2	750	200
19	18.3	29,965	9,2	750	272
26	18.3	32,467	9,2	750	216
33	18.3	19,974	9,2	750	105
Средняя производительность ($M_{\text{п}}$) = 0,1259 т/ч					

Производственная мощность для непрерывных процессов рассчитывается по формуле [22]:

$$M = M_{\text{п}} \cdot T_{\text{э}} \cdot n = 0,1259 \cdot 3193 \cdot 1 = 402,113 \text{ т/Г}, \quad (3.1)$$

где $T_{\text{э}}$ – эффективный годовой фонд рабочего времени;

n – примем равным 1, так как производим расчет всей линии целиком.

3.2 Расчет сметы капитальных затрат

Для определения экономической эффективности мероприятий по установке транспортного оборудования необходимо определить сумму капитальных затрат на внедрение. Смета капитальных затрат будет включать в себя: стоимость приобретенного оборудования, затраты на монтаж оборудования, транспортные

расходы, заготовительно-складские расходы, затраты на запасные части и комплектацию.

Таблица 3.3 – Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Кол-во единиц, шт	Оптовая цена за единицу, тыс.руб.	Общая стоимость, тыс.руб.
Металлический каркас + колесные пары	1	501,421	501,421
Электродвигатель	1	51,351	51,351
Редуктор	1	40,000	40,000
Частотный преобразователь	1	88,576	88,576
Гидросистема	1	195,360	195,360
Электроаппаратура	4	50,712	202,84743
Силовые кабели	3	25,630	75,000
Металлический кожух для кабеля	1	30,000	30,000
Периферийное оборудование (датчики)	2	22,000	44,000
Дальномер	1	102,000	102,000
Рельсы	2	47,500	95,000
Итого			1180702,6

Дополнительные расходы на неучтенное оборудование составляют 10% от общей стоимости [22].

$$Z_{\text{доп}} = 1180702,6 \cdot 0,1 = 127821,93 \text{ руб.}$$

Затраты на монтаж возьмем в размере 8% от общей стоимости оборудования.

$$Z_{\text{монт}} = 1180702,6 \cdot 0,08 = 115039,739 \text{ руб.}$$

Затраты на транспортировку возьмем в размере 3,3% от общей стоимости оборудования.

$$Z_{\text{трансп}} = 1180702,6 \cdot 0,033 = 76693,16 \text{ руб.}$$

Итого капитальные затраты на внедрение транспортной тележки составят: 1500257,43 руб.

3.3 Расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования

Расчет трудоемкости ремонтных работ

Среднегодовая трудоемкость рассчитывается по формуле [22]:

$$T_{\text{ср.год}} = \frac{nc \cdot tc + nt \cdot tt + nk \cdot tk}{T_{\text{ц}}}, \quad (3.2)$$

где $T_{\text{ср.год}}$ – среднегодовая трудоемкость ремонта единицы оборудования чел·ч;

nk, nc и nt – количество капитальных, средних и текущих ремонтов в течении ремонтного цикла;

tk, tc и tt – средняя трудоемкость одного капитального, среднего и текущего ремонта чел·ч;

$T_{\text{ц}}$ – продолжительность ремонтного цикла, лет.

Таблица 3.4 – Нормы времени на ремонтную единицу для технического и подъемно-транспортного оборудования, нормо-часов

Осмотр и виды ремонта	Слесарные работы, н/ч	Электромонтажные работы, н/ч	Прочие работы, н/ч	Всего, н/ч
--------------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------------------	------------

Продолжение таблицы 3.4

Осмотр	0,75	0,1	-	0,85
Текущий	4,0	2,0	0,1	6,1
Средний	16,0	7,0	0,5	23,5
Капитальный	23,0	10,0	2,0	35,0

Среднегодовая трудоемкость ремонта для проектируемой транспортной тележки:

$$T_{\text{ср.год}} = \frac{23 \cdot 23,5 + 23 \cdot 6,1 + 10 \cdot 35}{8} = 130 \text{ чел.ч.}$$

Расчет численности ремонтного персонала

Базой для расчета численности ремонтного персонала является величина средней трудоемкости ремонтных работ $T_{\text{ср.год}}$. Численность ремонтного персонала определяется [22]:

$$N_{\text{рем}} = \frac{T_{\text{ср.год}}}{T_{\text{р}}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (3.3)$$

где $N_{\text{рем}}$ – численность ремонтного персонала;

$T_{\text{р}}$ – годовой фонд рабочего времени одного работника за смену (2000 ч);

$K_{\text{сп}}$ – коэффициент списочного состава.

$$K_{\text{сп}} = \frac{\text{календ. фонд работы-(вых.+пр.дни)}}{\text{календ. фонд работы-(вых.+пр.дни)-ср. кол-во неявки}}; \quad (3.4)$$

$$K_{\text{сп}} = \frac{365 - (104 + 11)}{365 - (104 + 11) - 36} = 1,17.$$

Тогда численность ремонтного состава:

$$N_{\text{рем}} = \frac{103}{2000} \cdot 1,17 = 0,06 \text{ чел.}$$

Минимально задействованное в ремонте и обслуживании количество работников – 1 человек.

Таблица 3.5 – Фонд оплаты труда персонала

Механик	3	215,28 (6 разряд)	103	66521,52
Мастер	1	255,68	86	21988,48
Итого				88509,48

Таблица 3.6 – Сумма страховых взносов от заработной платы персонала

Ставка, %	Сумма, руб./год
30	26608,608

Расчет затрат электроэнергии на технологические нужды

Стоимость одного киловатта электрической энергии прием равным 2,3 руб.

Таблица 3.7 – Затраты на электроэнергию

Мощность	Сумма, руб./год
11,5 кВт	84454,85

Амортизационные отчисления за основное оборудование

Норма амортизации для средств подъемно-транспортных (4 группа) – 14,7% отчислений от заработной платы работников на данном оборудовании [23].

Таблица 3.8 – Затраты на амортизационные отчисления

Группа амортизации	Норма амортизации, %	Сумма, руб./год
4	14,7	220537,8

Таблица 3.9 - Фактические расходы на ремонт оборудования

Основные статьи расходов	Сумма, руб./год
Замена гидроцилиндра	9500,00
Замена пускорегулирующей аппаратуры	15000,00
Замена гидравлической жидкости	5074,91
Итого	29574,91

Итого расходов на содержание и эксплуатацию оборудования: 449685,648 руб.

3.4 Оценка эффективности капитальных вложений

Необходимо оценить эффективность мероприятий по увеличению прибыли в результате капитальных вложений в техническое перевооружение.

Прибыль цеха «Высота 239», при проектной мощности, средней цене за тонну продукции 110000 руб. и рентабельности на уровне 26,66% составит [22]:

$$\Pi_{\text{год}} = P \cdot V \cdot R = 110000 \cdot 900000 \cdot 0,2666 = 26393400000 \text{ руб.}, \quad (3.5)$$

где $\Pi_{\text{год}}$ – годовая прибыль цеха;

R – рентабельность цеха;

P – средняя цена за тонну продукции;

V – годовая программа выпуска изделий, в тоннах.

Рентабельность от инвестиций в цех «Высота 239» составит [21]:

$$R_{\text{инв}} = \frac{P_{\text{год}}}{Z_{\text{кап.ц}}} \cdot 100\% = \frac{26393400000}{50160000000} \cdot 100\% = 53\%, \quad (3.6)$$

где $Z_{\text{кап.ц}}$ – капитальные вложения в цех «Высота 239» [1].

Так как передаточная тележка является частью цеха «Высота 239», то рентабельность от инвестиций в нее будет соответствовать общей рентабельности цеха, соответственно прибыль, приходящаяся на передаточную тележку за год, составит:

$$P_{\text{т.}} = Z_{\text{кап.т}} \cdot R_{\text{инв}} = 1500257,43 \cdot 0,53 = 789411,77 \text{ руб.}, \quad (3.7)$$

где $P_{\text{т.}}$ – годовая прибыль, приходящаяся на передаточную тележку;

$Z_{\text{кап.т}}$ – капитальные затраты на передаточную тележку;

$R_{\text{инв}}$ – рентабельность от инвестиций.

Рассчитаем срок окупаемости капитальных вложений [22]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{KB}{P_{\text{год}}}, \quad (3.8)$$

где KB – сумма капитальных вложений на внедрение мероприятий;

$P_{\text{год}}$ – годовая экономия от снижения себестоимости.

$$T_{\text{ок}} = \frac{1500257,43}{789411,77} = 1,9 \text{ года.}$$

Так как $3 > 1,9$, то можно сделать вывод о целесообразности проведения технического перевооружения в виде проектируемой передаточной тележки для перемещения труб.

Таблица 3.10 – Сводная таблица технико-экономических показателей мехатронной системы в цехе

Наименование показателя	Значения показателя
Капитальные вложения, руб.	1500257,43
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, руб. В том числе:	449685,65
- затраты на электроэнергию, руб.	84454,85
- затраты на амортизационные отчисления, руб.	220537,8
- текущий ремонт и содержание оборудования, руб.	29574,91
- фонд заработной платы, руб.	88509,48
- страховые взносы, руб.	26608,6
Итого годовая прибыль, руб.	789411,77
Срок окупаемости, лет	2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе разработки мехатронной системы передаточной тележки участка внутреннего покрытия цеха «Высота-239» был получен опыт расчетов главного привода. Подобран и рассчитан двигатель привода перемещения. Построены диаграммы и тахограммы привода перемещения. По необходимым критериям выбран частотный преобразователь и устройство защиты привода. Разработана кинематическая схема. Рассчитанный двигатель и система привода способны выполнять различные задачи транспортировки труб. Разработанный привод позволяет сохранять параметры транспортировки при изменяющейся нагрузке. Разработанная мехатронная система удовлетворяет требованиям, сформулированным в начале работы, способна выполнять различные задачи без возникновений ситуаций, в которых бы работа осуществлялась на пределе возможности. Также обеспечен срок окупаемости, не превышающий 3 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цех «Высота 239» Челябинского трубопрокатного завода. – http://www.chelpipe.ru/about/investment_projects/height_239.
2. Схемы технологических процессов в цехе «Высота 239». – http://www.chelpipe.ru/for_clients/steel_pipes/production_processes/tech_processes/#top.
3. Борисов, А.М. Основы построения промышленных сетей автоматики: учебное пособие / А.М. Борисов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. – 108 с.
4. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / М.П. Белов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
5. Расчеты крановых механизмов и их деталей: учебник: в 2 т. / под ред. Р.А. Лалаянца. – М.: ВНИИПТМаш, 1993. – Т. 1. – 187 с.
6. Яуре, А.Г. Крановый электропривод: справочник / А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
7. Курсовое проектирование грузоподъемных машин: учебное пособие / под ред. С.А. Казака. – М.: Высшая школа, 1989. – 319 с.
8. Цилиндро-конические редукторы и мотор-редукторы. – https://www.nord.com/cms/ru/product_catalogue/geared_motors/helical_bevel_geared_motors/pdp_helical_bevel_geared_motors_1527.jsp#top.
9. Режимы работы электродвигателей. – <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny.html#top>.
10. Лукин, А.Н. Преобразователь частоты для асинхронных электроприводов: учебное пособие / А.Н. Лукин, В.И. Косматов. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2005. – 68 с.
11. Частотный преобразователь Siemens SINAMICS G120D. – <http://sinamics.drives-ua.com/sinamics-g120d.html#top>.
12. ЭМС фильтр для преобразователя частоты. – <http://chistotnik.ru/ems-chastotnogo-preobrazovatelya.html#top>.

13. Автоматические выключатели 3RV20. – <https://www.siemens-pro.ru/3rv20/3RV2021-4BA10.html#top>.
14. Программируемые контроллеры SIMATIC S7-400. – https://www.siemens.com/sirius/products/automation/simatic/SIMATIC_S7/S7-400/#top.
15. Датчики Proxitron. – <http://proxitron-ua.com/products/#top>.
16. Лазерный датчик расстояния DL50. – <http://www.directindustry.com.ru/prod/sick/product-894-555070.html#top>.
17. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного электропривода: учебник / В.В. Москаленко. – М.: Изд-во ИНФРА-М, 2004. – 208 с.
18. Терехов, В.М. Непрерывные и цифровые системы управления скоростью и положением электроприводов: учебное пособие / В.М. Терехов. – М.: Изд-во МЭИ, 1972. – 768 с.
19. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями: учебное пособие для вузов / О.В. Слежановский, Л.В. Дацковский, И.С. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
20. Фомин, Н.В. Системы управления электроприводами: учебное пособие / Н.В. Фомин. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. – 350 с.
21. Руководство по монтажу, пуско-наладке, эксплуатации и техобслуживанию ЧТПЗ – «Высота 239». – Р. 2 Спецификация на поставляемое оборудование. – 154 с.
22. Определение экономической эффективности технических решений в дипломных проектах: методические указания / сост. Т.В. Попп. – Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 30 с.
23. Подъемно-транспортные и погрузочно-разгрузочные машины и оборудование. – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1927/bc794393c5ade023ea ac5bca1a89ae05e6a771e5/#top.