

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 автоматизация»  
Направление «Мехатроника и робототехника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА  
Служба безопасности ЧТПЗ

2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой  
В.Р. Гасияров

2018 г.

Реконструкция мехатронной системы клещевой тележки механического  
экспандера в составе линии по производству труб большого диаметра  
в условиях ПАО «ЧТПЗ»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА  
ЮУрГУ – 15.03.06.2018.313.ПЗ (ВКР)

Консультант  
Преподаватель  
Е.А. Маклакова

2018 г.

Руководитель работы  
Ст. преподаватель  
С.С. Воронин

2018 г.

Нормоконтролер  
Преподаватель  
Е.А. Маклакова

2018 г.

Автор работы  
студент группы П-456  
Андрей Игоревич Шумилин

2018 г.

Нормоконтролер  
Ст. преподаватель  
С.С. Воронин

2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Шумилин А.И. Выбор системы привода и основного силового оборудования привода движения клещевой тележки механического экспандера. – Челябинск: ЮУрГУ, П-456, 2018, 78 с., 30 ил., 8 табл., библиогр. список – 25 наим.

Целью данной работы является реконструкция привода передвижения клещевой тележки механического экспандера участка экспандирования и отделки цеха «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ».

Основными задачами работы являются выбор привода на основе анализа технологического процесса, проверка привода, выбор основного силового оборудования, разработка защиты привода, выбор схемы автоматизации, контроллера и датчиков технологических координат, разработка структурной схемы САР, моделирование типовых режимов работы привода, расчет производственной программы цеха, сметы капитальных затрат, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования, фонда оплаты труда, прибыли, срока окупаемости, и составление сводной таблицы технико-экономических показателей.

Анализ технологического процесса, выбор привода и основного силового оборудования был произведен на основе данных об оборудовании передвижения клещевой тележки в составе установки механического экспандера участка экспандирования и отделки цеха «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ».

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	8
1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма.....	8
1.1.1 Характеристика цеха .....	8
1.1.2 Описание технологического процесса работы механизма.....	11
1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма	16
1.3 Требование к приводам и системе автоматизации .....	17
1.4 Выбор системы привода .....	18
1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы .....	19
1.5.1 Построение тахограммы электропривода.....	19
1.5.2 Расчет силы сопротивления движению тележки .....	22
1.5.3 Предварительный выбор двигателя.....	23
1.5.4 Расчет статического момента.....	24
1.5.5 Расчет динамического момента .....	25
1.5.6 Построение нагрузочной диаграммы электропривода.....	27
1.5.7 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке.....	31
1.6 Выбор основного силового оборудования.....	33
1.6.1 Состав силовой части преобразователя частоты.....	35
1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств .....	37
1.7.1 Виды аварийных ситуаций, способы их предотвращения .....	37
1.7.2 Защита электродвигателя привода передвижения тележки.....	37
2 РАЗРАБОТКА САУ .....	40
2.1 Разработка архитектуры систем автоматизации .....	40
2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат .....	42
2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата .....	48
2.4 Разработка контура регулирования технологических координат .....	49
2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода.....	49
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ.....	58
3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции ...	58

3.2 Расчет производственной программы цеха .....	58
3.2.1 Расчет фактического годового фонда рабочего времени .....	58
3.2.2 Расчет производительности оборудования.....	59
3.3 Расчет сметы капитальных затрат .....	60
3.3.1 Расчет стоимости приобретенного оборудования .....	60
3.3.2 Расчет затрат на монтаж оборудования .....	61
3.3.3 Расчет затрат на запасные части .....	65
3.3.4 Расчет величины транспортных расходов .....	65
3.3.5 Расчет заготовительно-складских расходов .....	65
3.3.6 Расчет расходов на комплектацию оборудования .....	66
3.3.7 Расчет затрат на демонтаж, остаточной и ликвидационной стоимости .....	66
3.3.8 Расчет капитальных затрат .....	67
3.4 Расчет РСЭО.....	67
3.4.1 Расчет затрат на электроэнергию.....	67
3.4.2 Расчет амортизационных отчислений .....	68
3.4.3 Расчет затрат на ремонт и обслуживание .....	69
3.5 Расчет фонда оплаты труда и страховых отчислений .....	70
3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности.....	71
3.7 Расчет срока окупаемости проекта .....	72
3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчетов .....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77

## ВВЕДЕНИЕ

С момента своего появления машиностроение является основой индустрии [1, с.9]. С развитием этой отрасли науки и улучшением технологий обработки металлов стала возможной первая промышленная революция, внедрившая механический труд вместо ручного. С дальнейшим развитием механизмов и открытием электричества появились электроприводы, позволившие осуществить поточное производство товаров.

Благодаря цифровой революции появились современные системы автоматизации, способные свести участие человека в производственных процессах к минимуму или вовсе исключить его. Объединение электромеханических приводов с этими системами, управляемыми программами через микроконтроллеры, является мехатронной системой.

В наши дни мехатронные системы широко применяются в промышленности, например, в системах перемещения технологических агрегатов.

Клещевая тележка механического экспандера предназначена для перемещения трубы вдоль оси экспандера, проводя трубу вдоль инструмента для поэтапного расширения. Для перемещения тележки будет использоваться частотно-регулируемый асинхронный электропровод.

# 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма

### 1.1.1 Характеристика цеха

"Высота 239" является одним из крупнейших цехов по производству труб большого диаметра в России. Производство было запущено в июле 2010 года и оснащено современным промышленным оборудованием. С выходом на проектную мощность в 2011 году цех способен производить ежегодно по 900 000 тонн труб большого диаметра [2], что позволяет довести годовой объем производства этого вида труб на ЧТПЗ до 1,35 миллионов тонн.

ЧТПЗ располагает мощностями для производства труб практически любых типоразмеров. Оборудование "Высоты 239" позволяет изготавливать одношовные сварные трубы большого диаметра до 1420 мм, с толщиной стенки до 48 мм и длиной 12 и 18 метров, с наружным и внутренним покрытием.

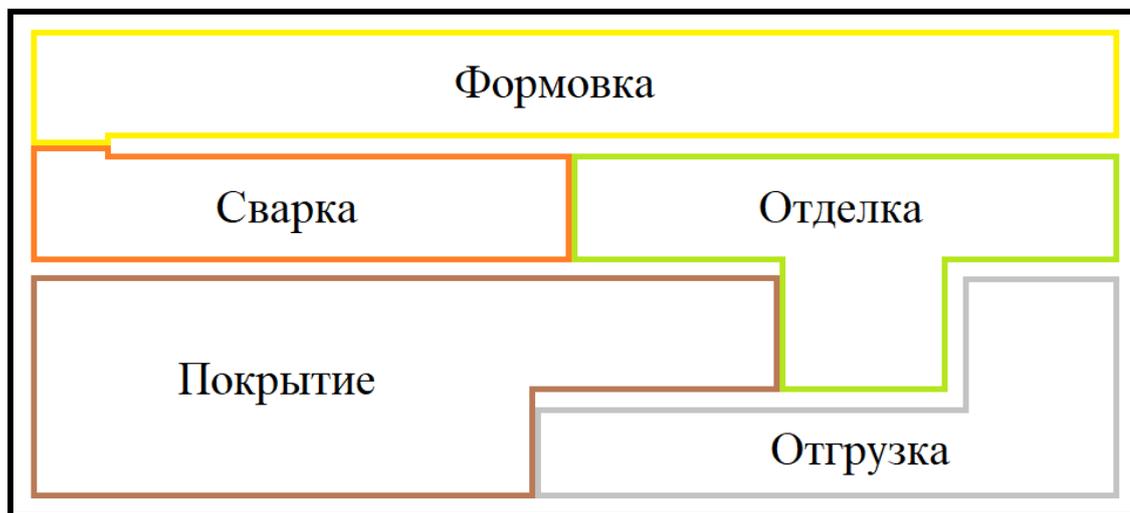
Изделия "Высоты 239" являются высококлассной продукцией, способной удовлетворить любые требования потребителя и эксплуатироваться в неблагоприятных условиях, будь то суровый климат, сейсмическая активность или прокладка по дну моря.

Цех состоит из участков пошаговой формовки, сварки, внутренней отделки и внешнего антикоррозийного покрытия.

Производственный процесс начинается со склада стальных листов (штрипса), являющимися заготовками для труб. Стальные листы перемещаются мостовыми кранами на транспортный конвейер, где к ним привариваются технологические пластины для минимизации расходов, поскольку при сварке трубы наблюдалось низкое качество сварного шва в начале трубы. Затем происходит обработка и подгибка кромок листа, после чего заготовка попадает

под гидропресс, пошагово формирующий ее трубообразную форму. На следующем этапе ее сваривают, проводят проверку качества, после чего отправляют на отделку.

Схема участков цеха представлена на рисунке 1.1.



ТЭСЦ "Высота 239"

Рисунок 1.1 – Схема участков цеха

На участке отделки трубу очищают и обрабатывают ее поверхности (в т.ч. экспандирование, торцовка, снятие фасок), проводят гидравлические испытания, промывают для очистки от загрязнений, нагревают для удаления влаги и проводят дробометную очистку для достижения необходимой чистоты и шероховатости для нанесения покрытия, затем продувают от остатков дроби и инспектируют на наличие дефектов,

На участке покрытия трубу нагревают до необходимой для нанесения покрытия температуры, наносят покрытие и охлаждают при помощи воды, проводят щеточную зачистку концов трубы.

После прохождения технологических этапов трубы проходят инспекцию, маркируются и попадают на склад.

Во время технического процесса заготовка подвергается ультразвуковому, рентгеновскому и магнитно-порошковому контролю, также происходит проверка сварных швов и геометрических параметров.

Если заготовка не удовлетворяет технологическим требованиям, ее либо отправляют на склад, либо на ремонт с последующим возвратом на производственную линию.

Схема технологического процесса изготовления труб на участках формовки, сварки и отделки представлена на рисунке 1.2, схема технологического процесса участка покрытия труб представлена на рисунке 1.3.

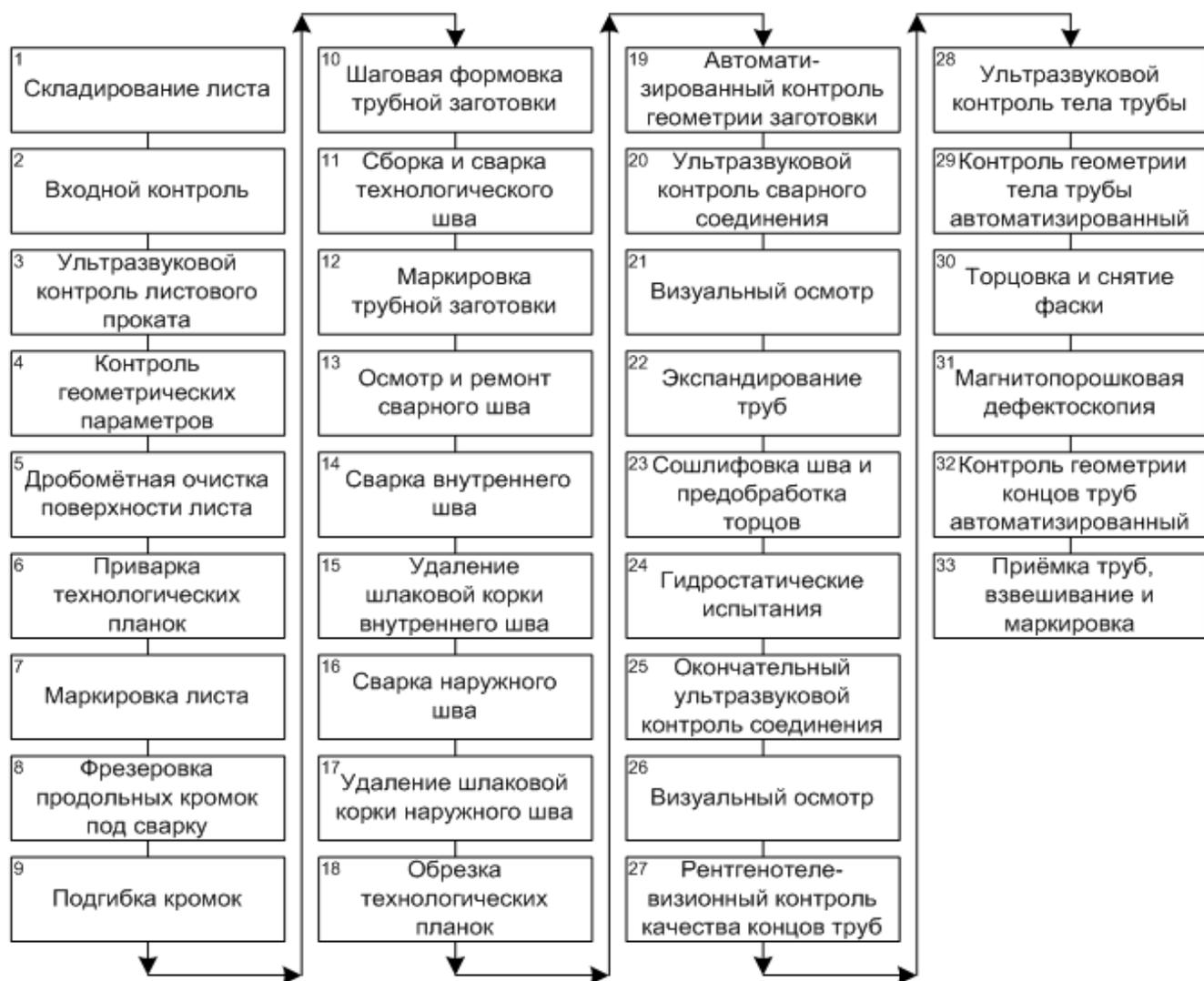


Рисунок 1.2 – Технологический процесс изготовления труб

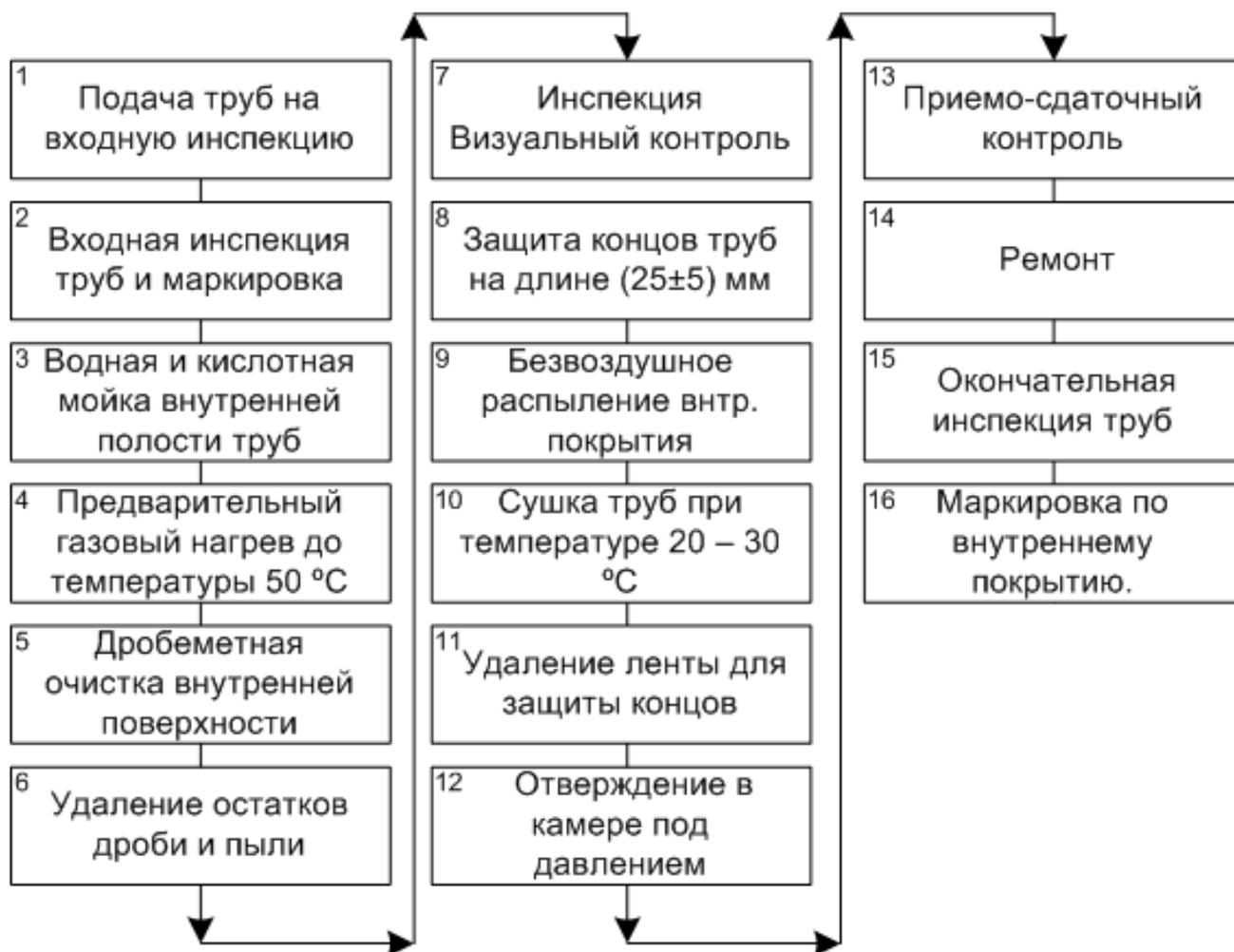


Рисунок 1.3 – Технологический процесс участка покрытия труб

### 1.1.2 Описание технологического процесса работы механизма

Оба экспандера расположены внутри установки таким образом, что для труб длиной до 12,5 м они могут работать как два отдельных механизма.

В этом случае на оба экспандера трубы подаются одноголовочным рольгангом. Тележки поперечной транспортировки перемещают трубу по отдельным станциям экспандера [3, с.46].

Последовательность операций:

- Вводной рольганг
- Промывка транспортировки
- Расширение

- Мойка
- Выводной рольганг

Оба экспандера имеют собственную станцию гидравлики и могут работать независимо друг от друга.

Начиная с длины трубы  $> 12,5$  м оба экспандера используются последовательно. Это означает, что труба расширяется до половины сначала на экспандере 5004036, а затем на экспандере 5004035 до готовности.

Последовательность операций:

- Вводной рольганг
- Промывка транспортировки
- Расширение 1-й половины трубы на экспандере 5004036 (поз. 2)
- Позиция приема для 2-го экспандера
- (Возможна 2-я промывка)
- Расширение 2-ой половины трубы на экспандере 5004035 (поз. 1)
- Мойка трубы
- Выводной рольганг

Упрощенная схема механизмов представлена на рисунке 1.4.

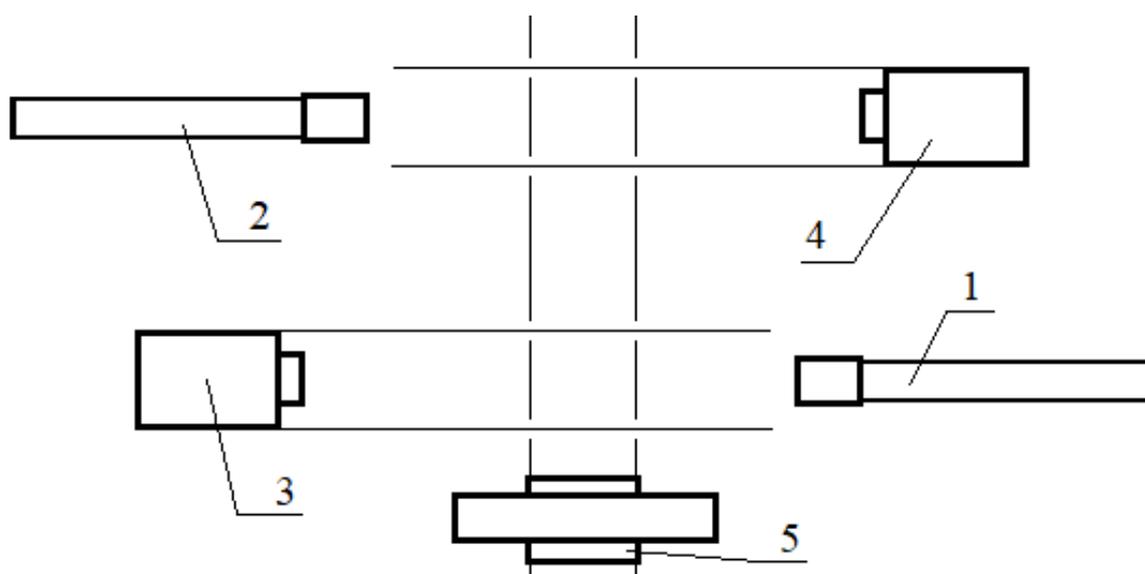


Рисунок 1.4 – Упрощенная схема экспандеров: 1 – экспандер 5004036, 2 – экспандер 5004035, 3 – клещевая тележки экспандера 1, 4 – клещевая тележка экспандера 2, 5 – тележка поперечного транспорта с трубой

На рисунке 1.5 представлена подробная схема механического экспандера.

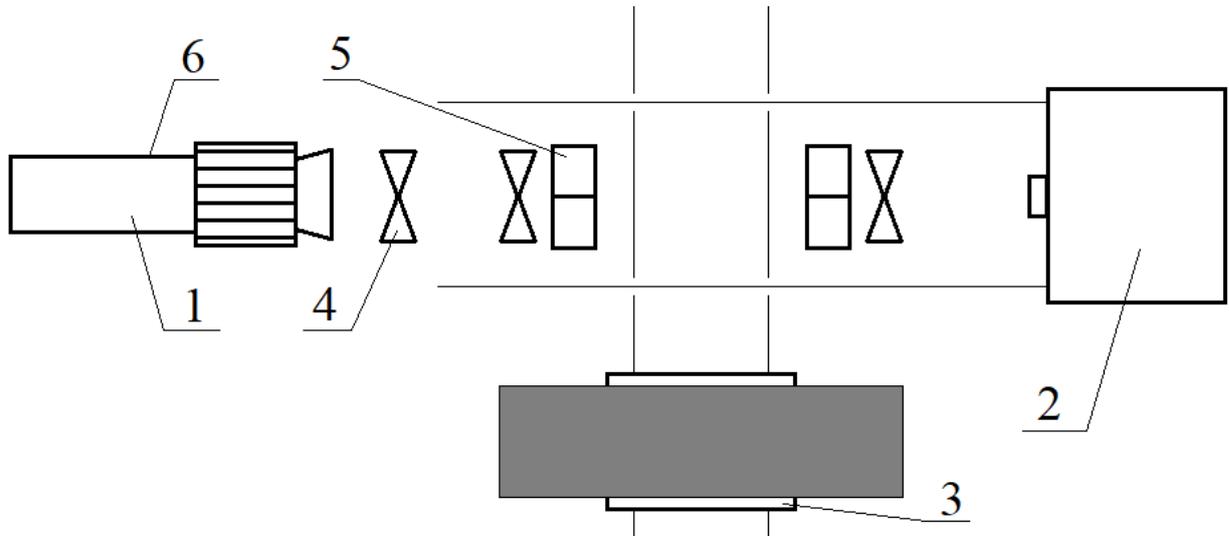


Рисунок 1.5 – Подробная схема механического экспандера: 1 – экспандер, 2 – клещевая тележка, 3 – передаточная тележка с трубой, 4 – один из трех роликов трубоподъемного устройства, 5 – один из двух поворотных устройств, 6 – роликовое транспортное устройство (под экспандером)

Технологический процесс экспандера:

- Труба уложена на двух поворотных устройствах по оси экспандера. При помощи телевизионной камеры и монитора в операторской кабине сварной шов трубы выравнивается относительно паза инструмента экспандера.
- Три подъемных устройства приподнимают трубу на ось экспандера.
- Включается старт тележки с клещами.

Состояние экспандера на данном этапе изображено на рисунке 1.6.

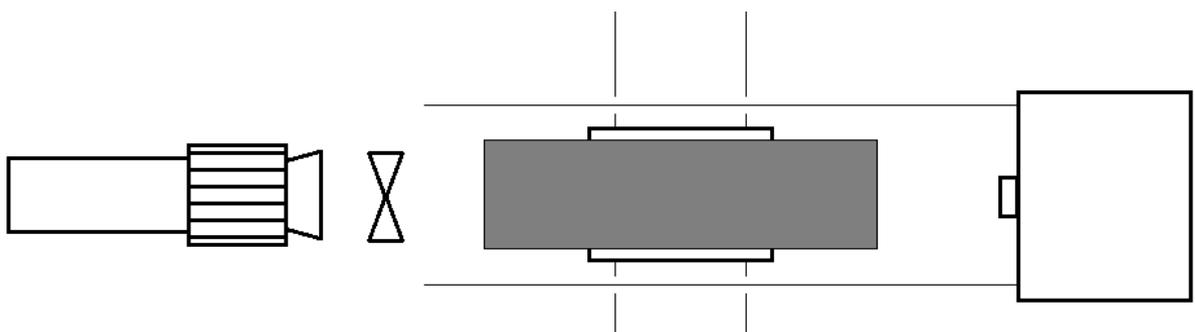


Рисунок 1.6 – Положение установки на момент старта тележки с клещами

– Тележка с клещами быстро перемещается вперед, пока 1 световой барьер на тележке не включится кромкой трубы. Потом привод переключается на малую скорость, пока не включится 2 световой барьер.

– Привод останавливается, клещи гидравлически закрываются и тележка с трубой быстро перемещается вперед. Первое подъемное устройство теперь опускается, поскольку при малом диаметре трубы существует опасность столкновения с тележкой с клещами.

Состояние экспандера на данном этапе изображено на рисунке 1.7.

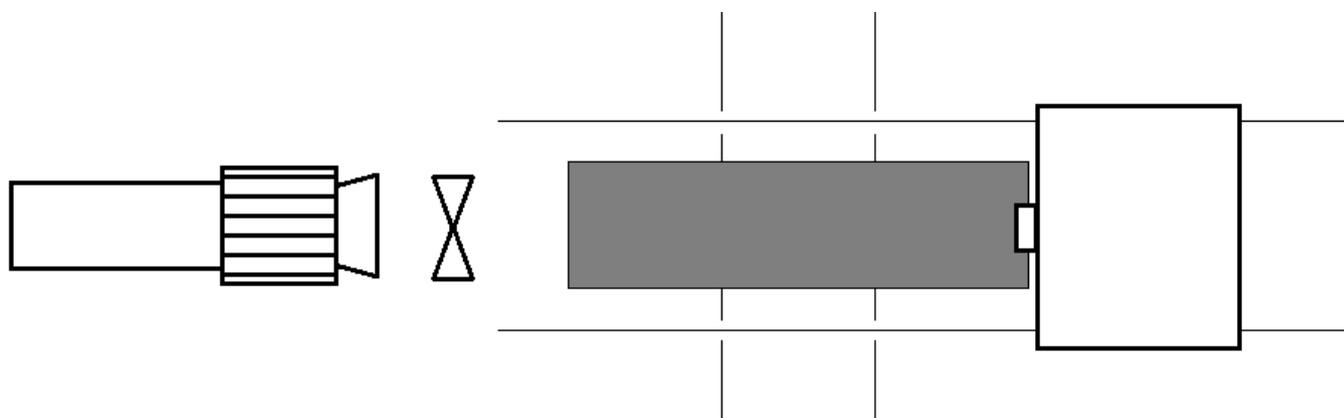


Рисунок 1.7 – Положение установки на момент старта тележки с трубой в клещах

– Когда световой барьер включается трубой перед головкой экспандера, производится расчет длины трубы. Для этого на приводе тележки с клещами смонтирован кодовый датчик угловых перемещений, который передает на вычислительную машину точную позицию тележки с клещами.

– Тем самым длина трубы установлена. Теперь рассчитывается число необходимых этапов расширения и округляется до целого этапа. Рассчитанная длина шага передается на привод тележки с клещами.

– Когда включается световой барьер, для тележки с клещами начинается последовательность этапов. Тележка с клещами может провести трубу по инструменту только на половине этапов. Вторую половину выполняет роликовое транспортное устройство.

Состояние экспандера на данном этапе изображено на рисунках 1.8 и 1.9.

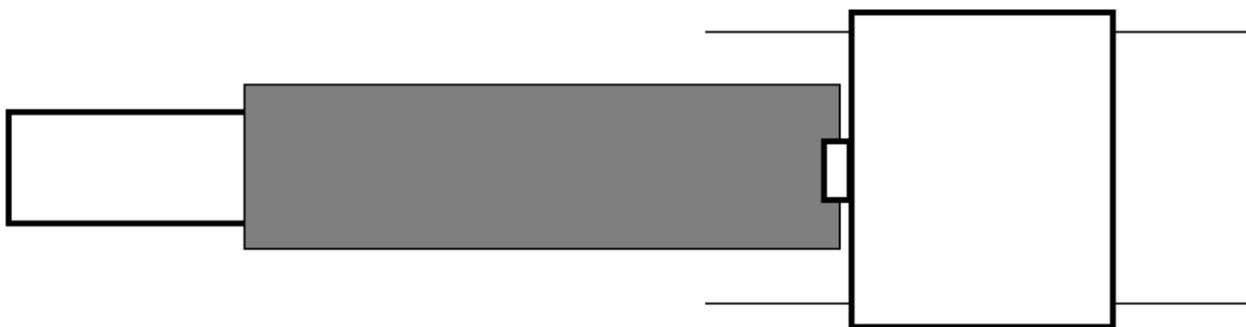


Рисунок 1.8 – Положение установки на момент экспандирования первой половины шагов

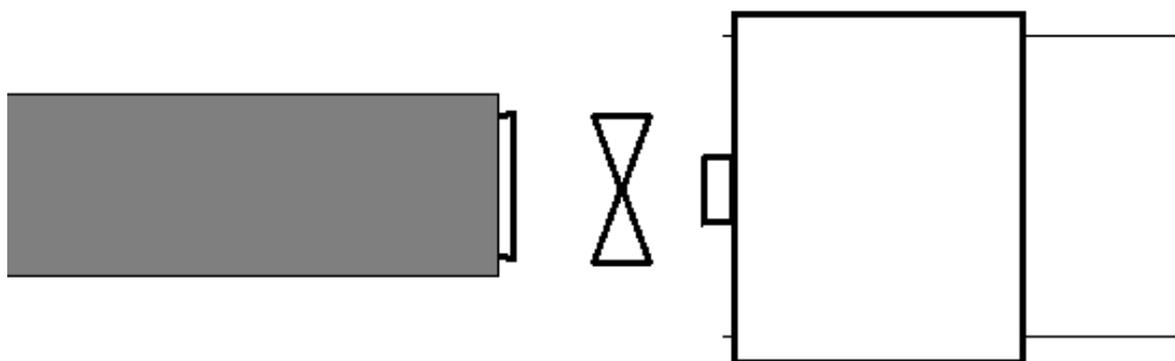


Рисунок 1.9 – Положение установки на момент экспандирования второй половины шагов

– Когда труба прошла поэтапное расширение, роликотное транспортное устройство подает трубу обратно в открытые клещи. Тележка с клещами снова принимает трубу и на повышенной скорости снимает ее с поперечины. Когда тележка с клещами достигнет позиции, где она приняла трубу, она останавливается, клещи открываются и переходят в исходное положение.

– Труба лежит на 3-х трубоподъемных устройствах. Ролики трубоподъемного устройства оснащены электромагнитными тормозами, чтобы избежать смещения трубы.

## 1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

Клещевая тележка обладает следующими характеристиками:

Таблица 1.1 – Характеристики клещевой тележки

Характеристика	Значение
Грузоподъемность, кг	25855
Ширина тележки, мм	2760
Длина тележки, мм	4010
Длина тележки(с противовесом), мм	22261
Высота тележки, мм	3561
Масса тележки, кг	8124
Масса тележки(с противовесом), кг	20948
Исполнение тележки	Металл
Условия эксплуатации	В помещении
Парковочное место	В помещении
Рабочая температура, °С	0 - 40

На рисунке 1.10 представлена кинематическая схема мехатронной системы передвижения клещевой тележки.

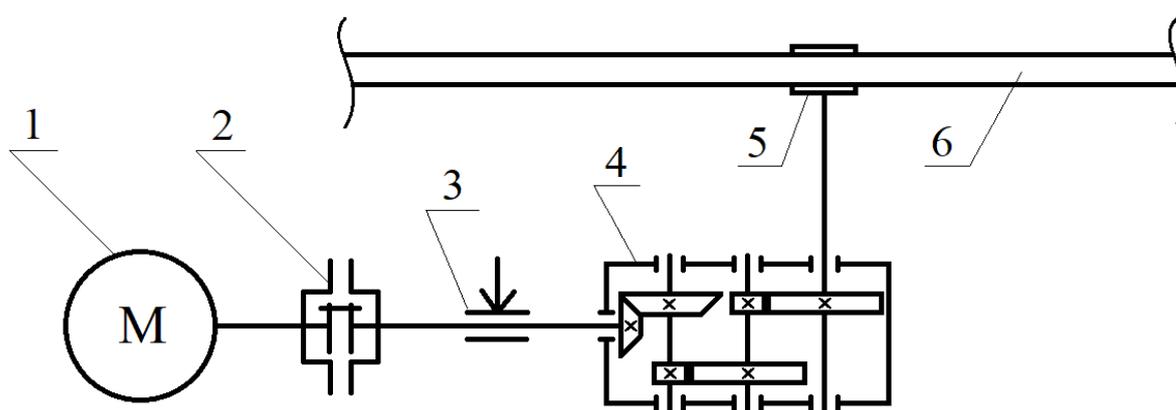


Рисунок 1.10 – Кинематическая схема системы передвижения клещевой тележки: 1 – электродвигатель, 2 – муфта предельного момента, 3 – тормозной диск, 4 – редуктор, 5 – вал-шестерня, 6 – зубчатая рейка

### 1.3 Требования к приводу и системе автоматизации

Ориентировочные требования к приводу можно получить, проанализировав параметры одного шага экспандирования для самого тяжелого режима работы:

масса трубы из материала Ст.17ХН9 с диаметром 1420 мм с толщиной стенки 42 мм длиной 18 м составляет 25855 кг;

длина шага экспандирования не более 950 мм;

время движения не более 1,44 с;

При равноускоренном движении тележки на первой половине пути и равнозамедленном на второй:

$$v_{\text{CP}} = \frac{L}{t} = \frac{0,95}{1,44} \approx 0,66 \text{ м/с}, \quad (1.1)$$

где  $L$  – длина шага экспандирования, м;

$t$  – время шага экспандирования, с.

$$a = L \frac{4}{t^2} = 0,95 \cdot \frac{4}{2,0736} \approx 1,83 \text{ м/с}^2. \quad (1.2)$$

Привод должен обеспечивать набор необходимой скорости движения тележки за короткое время вне зависимости от массы экспандируемой трубы.

Таким образом, требования к системе привода таковы:

- обеспечение маршевой скорости не менее 0,66 м/с;
- обеспечение линейного ускорения не более 2,05 м/с<sup>2</sup>;
- обеспечение диапазона регулирования скорости 1:7 [0,118–0,725 м/с];
- обеспечение точности позиционирования в 10 мм;
- отсутствие перемещения при поднятых трубоподъемных рольгангах;
- ограничение длительного максимального момента двигателя в 1400 Н·м;
- остановка на границах пути и возможность реверса скорости и момента.

Поскольку шаги экспандирования рассчитываются с заданным значением перекрытия порядка десяти миллиметров, высокой точности позиционирования не требуется.

#### 1.4 Выбор системы привода

По заданным требованиям выберем регулируемый электропривод с трехфазным асинхронным серводвигателем.

Серводвигатель обладает большой мощностью по сравнению с габаритами и массой двигателя [4], большим ускорением и крутящим моментом на любой скорости, что необходимо для обеспечения требуемых динамических характеристик. Наличие энкодера в составе серводвигателя позволяет использовать обратную связь для требуемого позиционирования вала.

Среди достоинств серводвигателей также отсутствие явлений резонанса и вибрации, тихая работа на высоких скоростях и низкий нагрев [5].

Скорость вращения вала серводвигателя будет регулироваться благодаря изменению частоты напряжения питания с помощью преобразователя частоты.

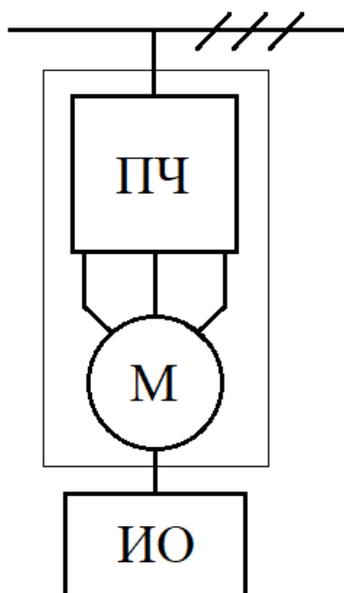


Рисунок 1.11 – Упрощенная схема электропривода: ПЧ – преобразователь частоты, М – электродвигатель, ИО – исполнительный орган



$$v_{CP} = \frac{L}{t} = \frac{5,616}{7,75} \approx 0,725 \text{ м/с}, \quad (1.3)$$

где  $L$  – путь тележки, м;

$t$  – время прохождения пути тележкой, с.

$$v_{II} = \frac{L}{t} = \frac{0,129}{1,1} \approx 0,118 \text{ м/с}. \quad (1.4)$$

Рассчитаем ускорения при развитии маршевой и «ползучей» скоростей:

$$a = \frac{v_{CP}}{t} = \frac{0,725}{0,395} \approx 1,835 \text{ м/с}^2, \quad (1.5)$$

где  $t$  – время достижения скорости тележки, с.

$$a_{II} = \frac{v_{II} - v_{CP}}{t} = \frac{-0,607}{0,3} \approx -2,023 \text{ м/с}^2. \quad (1.6)$$

Угловая скорость вала-шестерни при маршевой и «ползучей» скоростях:

$$\omega = \frac{v_{CP} \cdot i}{d/2} = \frac{0,725 \cdot 21,3}{0,114} = 135,46 \text{ рад/с}, \quad (1.7)$$

где  $d$  – делительный диаметр зубчатого колеса, м;

$i$  – передаточное число редуктора.

$$\omega_{II} = \frac{v_{II} \cdot i}{d/2} = \frac{0,118 \cdot 21,3}{0,114} = 22,05 \text{ рад/с}. \quad (1.8)$$

На основе рассчитанных данных и рисунка 1.12 построим упрощенную (т.е. лишь с одним отдельным шагом экспандирования) тахограмму рабочего цикла: см. рисунок 1.13.

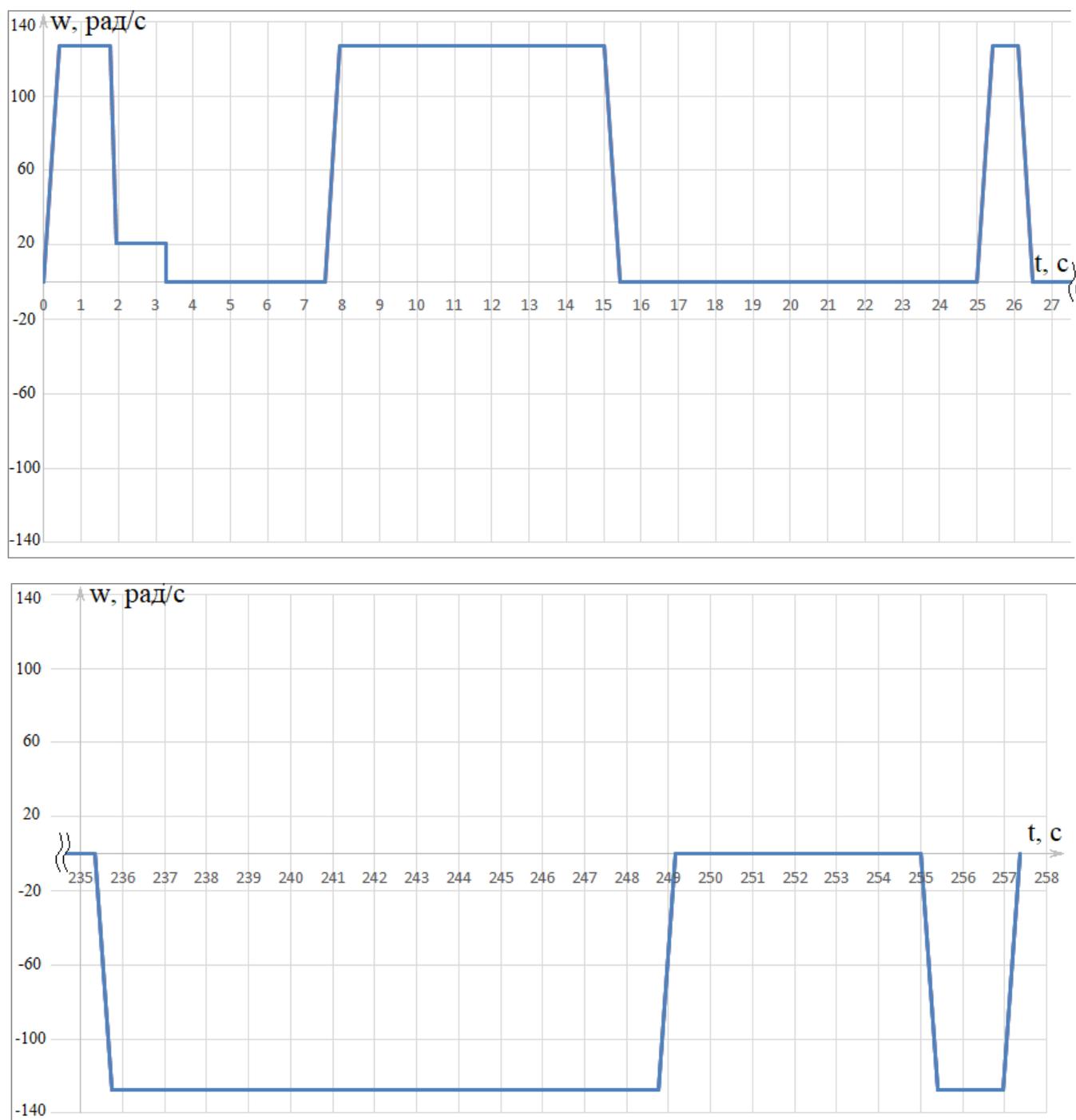


Рисунок 1.13 – Тахограмма рабочего цикла клещевой тележки

Как видно из рисунка 1.12, всего будет десять идентичных участков тахограммы между 25,01 и 26,51 с, которые расположатся в периоде от 25,01 до 119,45 с.

### 1.5.2 Расчет силы сопротивления движению тележки

Сопротивление движению тележки оказывают аэродинамические силы, а также силы трения внутри передачи и уклона пути движения.

Сила сопротивления движению клещевой тележки в общем случае [6]:

$$F = F_{\text{трение}} + F_{\text{уклон}} = m \cdot g \cdot \left( \frac{2 \cdot \mu + f \cdot d}{D} \cdot k + \sin \alpha \right), \quad (1.9)$$

где  $m$  – масса тележки, кг;

$\mu$  – коэффициент трения качения стального колеса по стали;

$f$  – коэффициент трения качения конических роликоподшипников колесного блока Demag DRS250;

$d$  – внутренний диаметр подшипника колесного блока Demag DRS250, м;

$D$  – диаметр колеса из колесного блока Demag DRS250, м;

$k$  – коэффициент трения реборд;

$\sin \alpha$  – коэффициент уклона, зависящий от угла наклона рельс.

Для тележки с трубой:

$$F = 46803 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{2 \cdot 0,001 + 0,09 \cdot 0,01}{0,25} \cdot 2 + 0,005 \right) = 12934,5 \text{ Н} \quad (1.10)$$

Для пустой тележки:

$$F_{\text{пуст}} = 20948 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{2 \cdot 0,001 + 0,09 \cdot 0,01}{0,25} \cdot 2 + 0,005 \right) = 5789,2 \text{ Н} \quad (1.11)$$

Также необходимо рассчитать коэффициент полезного действия всего привода:

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{шпр}} = 0,949 \cdot 0,95 \cdot 0,975 = 0,88, \quad (1.12)$$

где  $\eta_{\text{дв}}$  – КПД двигателя;

$\eta_{\text{р}}$  – КПД редуктора;

$\eta_{\text{шпр}}$  – КПД передачи шестерня-рейка.

### 1.5.3 Предварительный выбор двигателя

Поскольку для обеспечения необходимых динамических характеристик системы исполнительного механизма предполагается большой коэффициент запаса по мощности двигателя, его коэффициент полезного действия будет меньше рассчитанного ранее.

Проведем примерный расчет мощности электродвигателя по формуле [6]:

$$\begin{aligned} P_{\text{р}} &= \frac{(F + 1,3 \cdot m \cdot a) \cdot v}{\eta \cdot \psi} = \\ &= \frac{(12934,5 + 1,3 \cdot 46803 \cdot 1,835) \cdot 0,725}{0,7 \cdot 2} = 64516,23 \text{ Вт}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

где  $\eta$  – сниженный КПД двигателя;

$\psi$  – коэффициент перегрузки двигателя при пуске.

Примем коэффициент запаса по мощности равным 2.8, тогда итоговая мощность привода  $P = 2,8 \cdot P_p = 2,8 \cdot 64516,23 = 180645,43 \text{ Вт} \approx 179 \text{ кВт}$ .

Таким образом, по полученным данным выберем серводвигатель Siemens 1PH7 228 с мощностью 179 кВт.

Характеристики двигателя представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики двигателя

Характеристика	Значение
Номинальная мощность $P_n$ , кВт	179
Номинальное линейное напряжение статора $U_{1n}$ , В	395
Номинальная частота вращения $N_n$ , об/мин	1750
Максимальная частота вращения $N_{max}$ , об/мин	4500
Номинальный ток $I$ , А	342
Номинальный момент двигателя $M_n$ , Н м	975
Перегрузочная способность по моменту $\lambda$	2,5
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,81
Момент инерции $J_{дв}$ , кг · м <sup>2</sup>	2,326
Масса $m$ , кг	860

#### 1.5.4 Расчет статического момента

Статическим моментом называется момент сил сопротивления, определенный действующими на механическую часть внешними силами и моментами, исключая момент двигателя [7, с.32].

Формула статического момента:

$$M_C = \frac{F \cdot d}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (1.14)$$

Статический момент для тележки без трубы:

$$M_{C1} = \frac{5789,2 \cdot 0,114}{21,3 \cdot 0,88} = 35,21 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.15)$$

Статический момент для тележки с трубой:

$$M_{C2} = \frac{12934,5 \cdot 0,114}{21,3 \cdot 0,88} = 78,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.16)$$

### 1.5.5 Расчет динамического момента

Динамическим моментом называется момент сил, пропорциональный моменту инерции и ускорению масс [7, с.85].

Формула динамического момента:

$$M_{Д} = J \cdot \varepsilon, \quad (1.17)$$

где  $J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varepsilon$  – угловое ускорение вала двигателя,  $\text{рад/с}$ .

$$J = J_{ДВ} + J_{РЕД} + \frac{m \cdot v^2}{\omega^2}, \quad (1.18)$$

где  $J_{РЕД}$  – приведенный момент инерции редуктора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Поскольку моменты инерции отдельных зубчатых колес редуктора неизвестны, примем приведенный момент инерции  $J_{\text{РЕД}} = 0,174 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  для удобства вычислений, исходя из размеров редуктора.

Приведенный момент инерции для тележки с трубой:

$$J_1 = 2,326 + 0,174 + \frac{46803 \cdot 0,725^2}{135,46^2} = 3,84 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.19)$$

Приведенный момент инерции для тележки без трубы:

$$J_2 = 2,326 + 0,174 + \frac{20948 \cdot 0,725^2}{135,46^2} = 3,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.20)$$

Угловое ускорение для достижения маршевой скорости:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot i}{d/2} = \frac{1,835 \cdot 21,3}{0,114} = 342,85 \text{ рад} / \text{с}^2. \quad (1.21)$$

Угловое ускорение для достижения «ползучей» скорости:

$$\varepsilon_{\text{П}} = \frac{a_{\text{П}} \cdot i}{d/2} = \frac{2,023 \cdot 21,3}{0,114} = 378,04 \text{ рад} / \text{с}^2. \quad (1.22)$$

Динамический момент для участка маршевой скорости без трубы:

$$M_{\text{Д1}} = J_2 \cdot \varepsilon = 3,1 \cdot 342,85 = 1062,84 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.23)$$

Динамический момент для участка «ползучей» скорости:

$$M_{Д2} = J_2 \cdot \varepsilon_{П} = 3,1 \cdot 378,04 = 1172 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.24)$$

Динамический момент для участка маршевой скорости с трубой:

$$M_{Д3} = J_1 \cdot \varepsilon = 3,84 \cdot 342,85 = 1316,54 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.25)$$

### 1.5.6 Построение нагрузочной диаграммы электропривода

Произведем расчет нагрузки на валу двигателя по основному уравнению движения электропривода:

$$M = \sum M_C + \sum M_D. \quad (1.26)$$

1) Первый участок: ускорение до маршевой скорости без трубы.

$$M_1 = M_{C1} + M_{Д1} = 35,21 + 1062,84 = 1098,05 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.24)$$

2) Второй и четвертый участок: равномерное движение без трубы.

$$M_2 = M_4 = M_{C1} = 35,21 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.25)$$

3) Третий участок: замедление до «ползучей» скорости без трубы.

$$M_3 = M_{C1} - M_{Д2} = 35,21 - 1172 = -1136,79 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.26)$$

4) Пятый участок: замедление с «ползучей» скорости до полной остановки без трубы.

$$M_5 = M_{C1} - M_{Д2} = 35,21 - 1172 = -1136,79 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.27)$$

5) Восьмой и двенадцатый участки: равномерное движение с трубой.

$$M_8 = M_{12} = M_{C2} = 78,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.28)$$

6) Седьмой и одиннадцатый участки: ускорение до маршевой скорости с трубой.

$$M_7 = M_{11} = M_{C2} + M_{Д3} = 78,7 + 1316,54 = 1395,24 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.29)$$

7) Девятый и тринадцатый участки: замедление с маршевой скорости до полной остановки с трубой.

$$M_9 = M_{13} = M_{C2} - M_{Д3} = 78,7 - 1316,54 = -1237,84 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.30)$$

8) Четырнадцатый участок состоит из девяти повторений участков 10-13, последовательно идущих друг за другом и составляющих примерно половину всего участка, а затем десятого участка с  $M=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (т.к. на шестом, десятом и восемнадцатом участках отсутствует работа двигателя).

9) Пятнадцатый участок: реверс до маршевой скорости с трубой.

$$M_{15} = M_{C2} - M_{Д3} = 78,7 - 1316,54 = -1237,84 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.31)$$

10) Шестнадцатый участок: равномерное движение с трубой.

$$M_{16} = -M_{C2} = -78,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.32)$$

11) Семнадцатый участок: замедление с реверса маршевой скорости до полной остановки с трубой.

$$M_{17} = M_{C2} + M_{Д3} = 78,7 + 1316,54 = 1395,24 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.33)$$

12) Двадцатый участок: равномерное движение без трубы.

$$M_{20} = -M_{C1} = -35,21 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.34)$$

13) Девятнадцатый участок: реверс до маршевой скорости без трубы.

$$M_{19} = M_{C1} - M_{Д1} = 35,21 - 1062,84 = -1027,63 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.35)$$

14) Двадцать первый участок: замедление с реверса маршевой скорости до полной остановки без трубы.

$$M_{21} = M_{C1} + M_{Д1} = 35,21 + 1062,84 = 1098,05 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.36)$$

На основе рассчитанных данных построим упрощенную (т.е. включающую только один отдельный шаг экспандирования) нагрузочную диаграмму электропривода.

Упрощенная нагрузочная диаграмма представлена на рисунке 1.14.

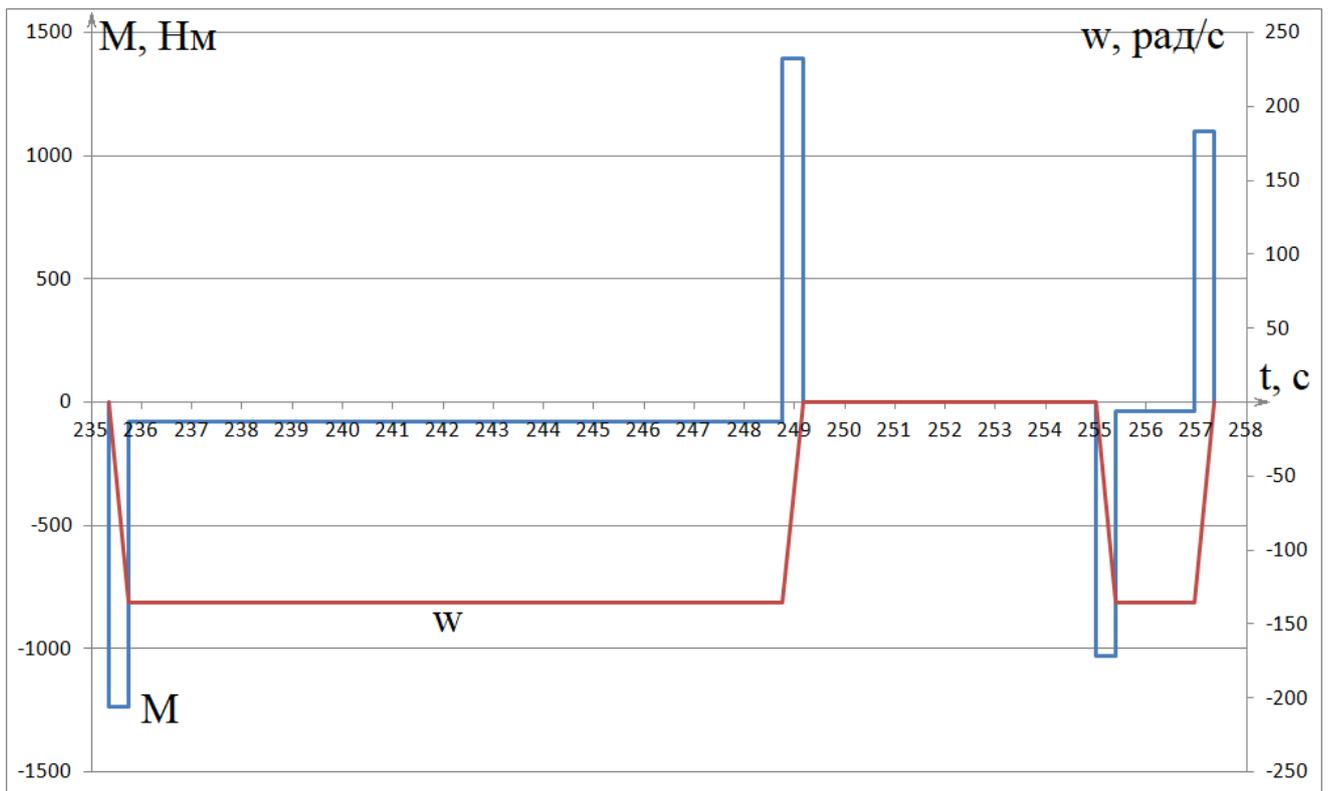
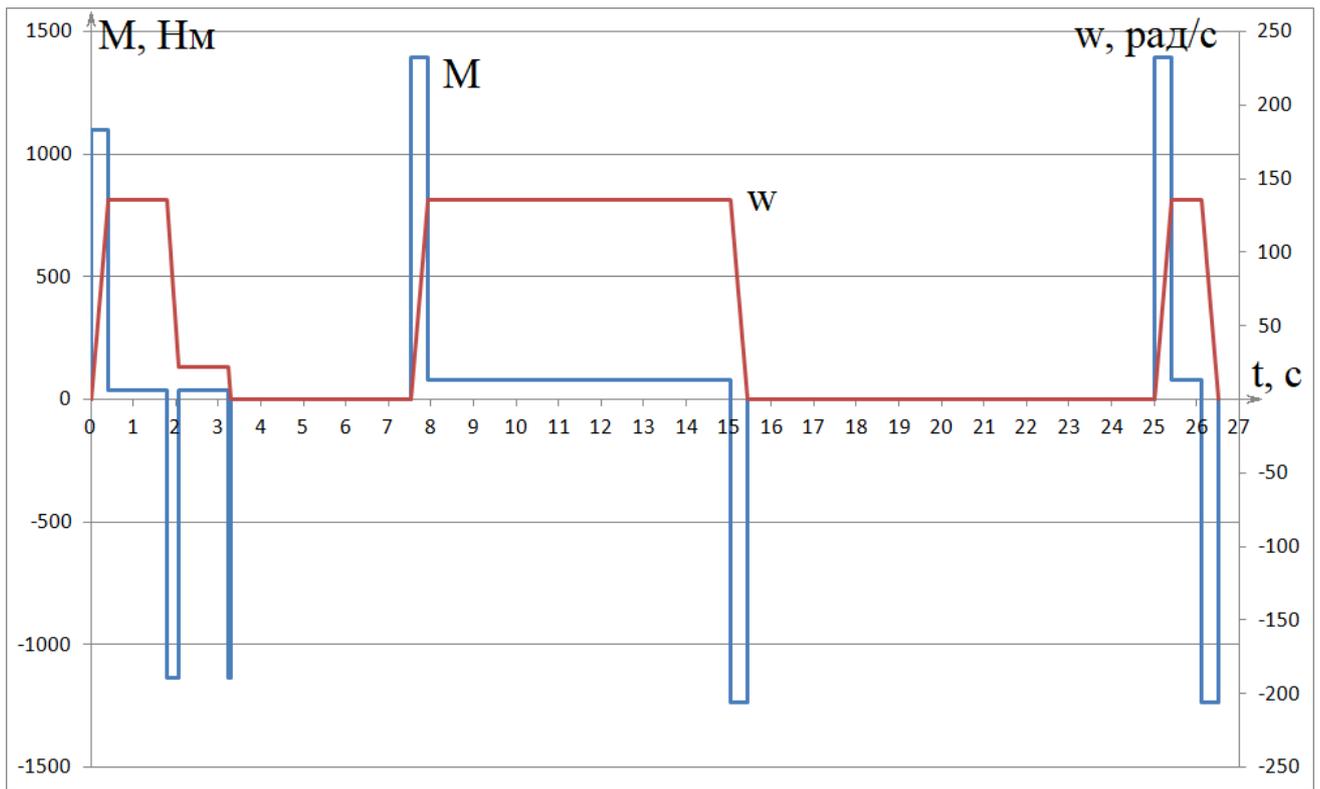


Рисунок 1.14 – Нагрузочная диаграмма цикла клещевой тележки

### 1.5.7 Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Проверка двигателя по нагреву осуществляется методом эквивалентного момента по формуле:

$$M_{\text{Э}} = M_{\text{ф}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{ф}}}{\varepsilon_{\text{ст}}}}, \quad (1.37)$$

где  $\varepsilon_{\text{ф}}$  – фактическая продолжительность включения;

$\varepsilon_{\text{ст}}$  – стандартная продолжительность включения;

$M_{\text{ф}}$  – фактический момент двигателя при стандартной продолжительности включения, Н·м.

Формула фактического момента:

$$M_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{\sum(M^2 \cdot t)}{t_{\text{ц}}}}, \quad (1.38)$$

где  $M$  – значение момента на некотором участке нагрузочной диаграммы, Н·м;

$t$  – продолжительность этого участка, с;

$t_{\text{ц}}$  – продолжительность цикла, с.

Поскольку минимальное расчетное время цикла составляет 257.36 секунд, дополним его до 270 секунд для операции погрузки/разгрузки и удобства вычислений.

Вычислим значение фактического момента:

$$M_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{18617447,187}{270}} = 262,59 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.39)$$

Определим фактическую продолжительность включения двигателя:

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{t_p}{t_{ц}}, \quad (1.40)$$

где  $t_p$  – время работы двигателя, с.

Фактическая продолжительность включения равна:

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{0,79 + 4,74 + 0,395 + 4,115 + 27,26 + 0,395 + 4,76}{270} = 0,157. \quad (1.41)$$

Стандартные продолжительности включения  $\varepsilon_{ст}$  бывают 0,15, 0,25, 0,4 и 0,6 [8]. Выбирается ближайшая стандартная к фактической продолжительности включения, в данном случае это  $\varepsilon_{ст} = 0,15$ .

Вычислим эквивалентный момент:

$$M_{\Theta} = 262,59 \cdot \sqrt{\frac{0,157}{0,15}} = 268,65 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (1.42)$$

Проверим справедливость следующего неравенства:

$$M_{\Theta} < M_H, \quad (1.43)$$

где  $M_H$  – номинальный момент двигателя.

Как видим, неравенство справедливо:

$$268,65 < 975$$

Таким образом, двигатель проходит проверку по нагреву.

Проверим двигатель на перегрузку:

$$M_{\max} \leq \lambda \cdot M_H, \quad (1.44)$$

где  $M_{\max}$  – максимальное значение момента на нагрузочной диаграмме, Н·м;

$\lambda$  –перегрузочная способность двигателя по моменту.

Неравенство справедливо:

$$1395,24 \leq 2437,5 = 975 \cdot 2,5$$

Двигатель проходит проверку на перегруз.

## 1.6 Выбор основного силового оборудования

Целью подбора преобразователя частоты (ПЧ) является обеспечение качественного управления действующими мощностями, контроля технологического процесса, а также рационального использования электроэнергии [9]. Преобразователь частоты способен регулировать частоту вращения вала двигателя, изменяя частоту питающего напряжения.

Выбор ПЧ основывается на требованиях, предъявляемых к данному приводу, среди которых границы рабочих скоростей и моментов двигателя, характер нагрузки и циклограмма работы [10].

Также следует учитывать конструктивные особенности преобразователя частоты, такие как необходимая степень защиты (IP), его геометрические размеры, возможность выноса пульта управления и т.д.

Основными критериями выбора преобразователя частоты служат величины питающего напряжения и потребляемого тока двигателя. ПЧ должен обеспечивать высокий пусковой момент или быстрое ускорение и замедление, поэтому его мощность не должна быть меньше мощности двигателя. Номинальный ток, потребляемый ПЧ, также должен быть больше номинального тока двигателя.

Преобразователь частоты также ограничивает пусковой ток двигателя по уровню (1.2-1.7 от номинального тока ПЧ) и по времени действия (до 60 секунд). Поэтому при механической нагрузке с большой инерционностью может потребоваться большое время разгона.

Чтобы избежать долгого разгона, следует взять преобразователь частоты, чья номинальная мощность намного превышает мощность двигателя [11].

Для целей частотного регулирования выберем частотный преобразователь Siemens Sinamics G120 с силовым модулем PM240 6SL3224-0XE41-6UA0.

Siemens Sinamics G120 подходит для любых применений в любой промышленности [12]. Преобразователь частоты обладает продвинутой системой охлаждения и модульной конструкцией, повышающей удобство монтажа, эксплуатации и ремонта.

Силовой модуль обеспечивает безопасное торможение после сбоя электропитания с использованием кинетической энергии, получаемой в результате нагрузки. Двигатель подключен непосредственно к этому модулю.

Характеристики преобразователя частоты представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики преобразователя частоты

Характеристика	Значение
Питающее напряжение, В	380-480 В $\pm$ 10%
Номинальная мощность, кВт	200
Номинальный входной ток, А	297-354
Частота питающей сети, Гц	47-63
Номинальный выходной ток, А	370-483
Номинальное выходное напряжение, В	400
Рабочая температура, °С	0 – 40
Ширина, мм	326
Высота, мм	1533
Глубина, мм	547
Примерная масса, кг	174

### 1.6.1 Состав силовой части преобразователя частоты

Схема преобразователя частоты содержит два преобразователя напряжения. Первый преобразователь работает со стороны сети в выпрямительном режиме (неуправляемый выпрямитель напряжения), второй – со стороны двигателя в инверторном режиме (автономный инвертор напряжения). Таким образом, идет преобразование энергии АС-DC-АС с изменением частоты напряжения, подводимого к двигателю.

Для сглаживания бросков тока и гармоник, а также для уменьшения электромагнитных помех в звено постоянного тока преобразователя частоты устанавливается LC-фильтр [13].

В совокупности в состав силовой части преобразователя частоты входят следующие компоненты:

- главный автоматический выключатель, предназначенный для защиты полупроводниковых приборов и кабелей;
- главный контактор цепи питания для коммутации электрической цепи в нормальном режиме;
- входной фильтр для подавления помех;
- блок неуправляемого выпрямителя, производящий преобразование АС-DC;
- индуктивно-емкостной фильтр цепи постоянного тока с блоком предварительного заряда конденсатора;
- трехфазный автономный инвертор напряжения, производящий преобразование DC-АС, выполненный на базе шестиключевого IGBT-блока, управляемый с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
- выходной фильтр, предназначенный для защиты выходной цепи от перегрузки, сглаживания фронтов и уменьшения выбросов напряжения на зажимах двигателя.

Силовая схема привода представлена на рисунке 1.15.

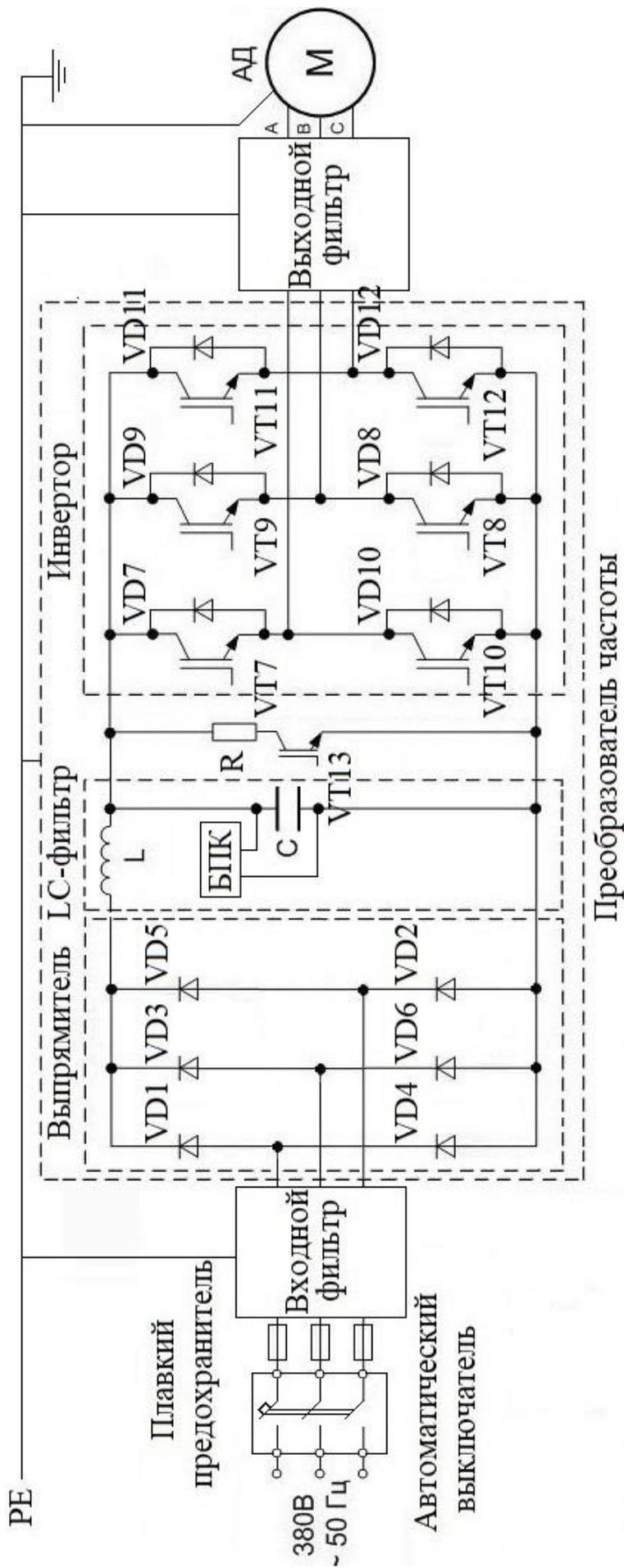


Рисунок 1.15 – Упрощенная силовая схема привода

## 1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств

### 1.7.1 Виды аварийных ситуаций, способы их предотвращения

Надежная работа привода возможна лишь при условии наличия защиты от внештатных ситуаций и предотвращения аварийных режимов.

Защита привода необходима как для защиты самого оборудования от выхода из строя, так и персонала от производственных травм.

Вид и параметры защитных устройств определяет характер возникающих аварийных ситуаций. Основными видами защит являются защита от коротких замыканий и защита от перегрузки.

Защита от короткого замыкания разрывает силовую цепь при появлении в ней тока короткого замыкания.

Мерами защиты от повреждения оборудования током короткого замыкания являются установка токоограничивающих реакторов, работающих как индуктивность, а также быстродействующее отключающее оборудование: плавкие предохранители и автоматические выключатели [14].

Защита от перегрузки предохраняет двигатель от перегрева, как значительного кратковременного, так и длительного незначительного. При перегреве двигателя происходит разрушение изоляции обмоток статора, что приводит к их замыканию и негодности двигателя [15].

Для защиты двигателя от тепловых перегрузок применяют электромагнитные, тепловые и температурные реле, а также автоматические выключатели.

### 1.7.2 Защита электродвигателя привода передвижения тележки

Для аварийного отключения питания двигателя применяют автоматические выключатели.

Для выбранного силового модуля рекомендуется силовой выключатель 3VL5750-1DC36 с номинальным током 500 А и стандартной отключающей способностью 45 кА.

Для защиты двигателя от тока короткого замыкания в добавок к автоматическим выключателям применяют плавкие предохранители. Для выбранного силового модуля рекомендуются плавкие предохранители 3NA3260 с номинальным током 400 А.

Поскольку выходные ток и напряжение частотного преобразователя имеют искаженную приближенно синусоидальную форму с большим количеством гармонических помех, а неуправляемый выпрямитель потребляет нелинейный ток, который загрязняет электрическую сеть высшими гармониками, питание обмоток двигателя таким током приводит к усилению шума работы двигателя, ускоренной эрозии подшипников и старении изоляции, что в свою очередь увеличивает вероятность теплового и электрического пробоя.

Кроме того, преобразователи частоты могут быть источником сильных электромагнитных помех, оказывая негативное влияние на другое электрическое оборудование данной сети.

Для снижения отрицательного воздействия искажений, возникающих в процессе работы преобразователя частоты, на электрическое оборудование применяют входные и выходные фильтры [16].

Входной фильтр служит для ослабления негативного влияния на сеть, оказываемого выпрямителем и инвертором. В состав входного фильтра входят сетевые дроссель и фильтр.

Сетевой дроссель защищает электрическую сеть от высших гармоник (5, 7, 11 порядка с частотами 250, 350, 550 Гц) и предохраняет преобразователь частоты от скачков питающих напряжения и тока. Для выбранного силового модуля рекомендуется сетевой дроссель 6SL3000-0CE35-1AA0.

Сетевой фильтр (ЭМИ-фильтр) предназначен для снижения электромагнитного излучения, создаваемого силовыми кабелями, для достижения электромагнитной совместимости с оборудованием, для которого

критичен уровень помех питающей электросети. Для выбранного силового модуля рекомендуется сетевой фильтр 6SL3000-0BE36-0AA0.

Выходной фильтр служит для ослабления помех, создаваемых инвертором с широтно-импульсным методом управления и внешними воздействиями. Выходным фильтром в данном приводе является синусоидальный фильтр, обеспечивающий сглаживание синусоидальных форм тока и напряжения, а также подавляющий высокие частоты. Синусоидальный фильтр способствует снижению шума и нагрева двигателя, уменьшает потери в преобразователе частоты. Для выбранного силового модуля рекомендуется синусоидальный фильтр 6SL3000-2CE33-3AA0.

Для обеспечения электробезопасности при потере изоляции применяется заземление корпусов электрооборудования с помощью защитного РЕ-проводника.

## 2 РАЗРАБОТКА САУ

### 2.1 Разработка архитектуры систем автоматизации

Любая автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) состоит из трех уровней.

Нижний уровень: уровень оборудования (входов-выходов, Input/Output level) [17]. Этот уровень представлен измерительными устройствами, контролирующими технологические параметры и исполнительными механизмами, воздействующих на эти параметры, приводя их в соответствие с технологическим заданием.

Средний уровень: уровень управления оборудованием (контроллеров с программируемой логикой, ПЛК-PLC – Programmable Logic Controller). Контроллер получает информацию с измерительных приборов о состоянии технологического процесса, формирует управляющие команды в соответствии с алгоритмом на исполнительные механизмы.

Верхний уровень: уровень сетевого оборудования, промышленного сервера, операторских и диспетчерских станций (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition, MES – Manufacturing Execution System). На этом уровне ведется контроль над ходом производственного процесса: ведется сбор данных с нижних уровней, происходит визуализация технологического процесса. На этом уровне задействован человек-оператор, взаимодействующий с технологическим оборудованием посредством человеко-машинного интерфейса (HMI – Human-Machine Interface). К этому уровню относятся мониторы и графические панели, устанавливаемые на пультах управления и шкафах с оборудованием автоматики.

Система SCADA является программным обеспечением, собирающим и визуализирующим поступающую информацию.

MES – специализированное программное обеспечение, предназначенное для синхронизации, координации, анализа и оптимизации технологического процесса [18].

На рисунке 2.1 представлена схема нижнего и среднего уровня системы автоматизации привода клещевой тележки.

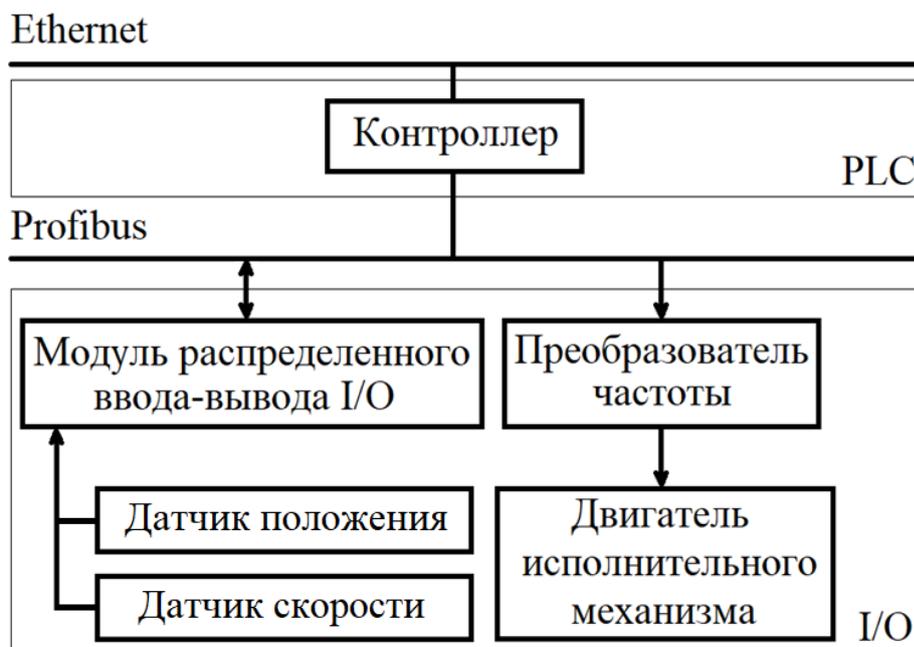


Рисунок 2.1 – Архитектура системы автоматизации

На полевом уровне расположены датчик положения и скорости – абсолютный энкодер, подключенный к модулю распределенного ввода-вывода, и двигатель исполнительного механизма, частота вращения вала которого управляется посредством преобразователя частоты.

На PLC уровне промышленный контроллер посредством сети PROFIBUS получает данные энкодера с модуля распределенного ввода-вывода, а также отправляет управляющие команды на преобразователь частоты.

Далее, по сети Ethernet контроллер отправляет данные на вышестоящий уровень SCADA и MES систем.

## 2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

Для построения сети автоматизированного управления технологическим процессом применяются контроллеры с программируемой логикой.

Исходя из особенностей технологического процесса выберем контроллер Siemens Simatic S7-400.

Контроллер Simatic S7-400 разработан для построения систем автоматического управления средней и высокой степенью сложности. Благодаря модульной конструкции, естественному охлаждению, широким коммуникационным возможностям, гибкости благодаря возможности расширения многочисленными модулями со множеством встроенных функций и простоты создания распределенных сетей управления, серия S7-400 подходит для решения любых задач автоматизации [19].

Контроллер Simatic S7-400 имеет модульную конструкцию и включает в себя следующие компоненты:

Модуль центрального процессора (CPU – Central Processing Unit). Процессоры используются для выполнения кода программы. В зависимости от технологического процесса применяются различные модули CPU, отличающиеся объемом доступной памяти, производительностью, наличием встроенных портов ввода-вывода, видом и количеством коммуникационных интерфейсов и иных специальных функций.

Сигнальные модули (SM – Signal Module). Сигнальные модули предназначены для ввода-вывода дискретных/аналоговых сигналов.

Коммуникационные процессоры (CP – Communication Processor). Коммуникационные процессоры предназначены для включения в различные виды промышленных сетей [20].

Функциональные модули (FM – Function Module). Функциональные модули выполняют определенные типовые задачи автоматизации, тем самым разгружая центральный процессор. Модули оснащены собственным микропроцессором,

что позволяет им выполнять свои задачи даже в случае остановки процессора основного контроллера.

Интерфейсные модули (IM – Interface Module). Интерфейсные модули позволяют объединить стойки с центральным процессором и станциями распределенного ввода-вывода.

Блоки питания (PS – Power Source). Блоки питания преобразовывают переменное или постоянное напряжение источника питания в необходимое для функционирования станции.

Сеть ввода-вывода контроллера S7-400 включает в себя локальную и распределенную системы ввода и вывода данных.

Локальная система ввода-вывода образуется модулями, которые устанавливаются непосредственно в монтажные стойки контроллера.

Распределенная система ввода-вывода представлена станциями удаленного ввода-вывода и устройствами полевого уровня, которые к ним подключены, сообщаясь с контроллером посредством промышленных сетей, таких как PROFINET или PROFIBUS.

Максимальное число подключаемых модулей локальной системы ввода-вывода зависит от типа центрального процессора, используемого контроллером.

Для целей автоматизации выберем центральный процессор CPU 414-3 (см. рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Центральный процессор CPU 414-3

Центральный процессор CPU 414-3 предназначен для систем автоматизации со средней степенью сложности, где необходим большой объем памяти и скоростное выполнение инструкций [21].

В качестве модуля удаленного ввода-вывода выберем станцию Siemens Simatic ET 200S (см. рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Станция распределенного ввода-вывода ET 200S

Станция ET 200S обладает интерфейсными модулями для подключения к сетям PROFINET и PROFIBUS DP, широким спектром модулей ввода-вывода аналоговых и цифровых сигналов, способна применяться в распределенных системах управления, критичных к скорости обработки информации [22].

Станция имеет степень защиты IP20 и предназначена для установки в шкафы управления.

Широкий спектр возможностей программирования, конфигурации и модулей, расширяющих возможности станции, делают ET 200S универсальной распределенной системой ввода-вывода.

Модульный принцип построения обеспечивает максимальную гибкость и адаптацию системы управления к требованиям технологического процесса.

При необходимости модификации конфигурация станции может быть легко изменена установкой дополнительных модулей с минимальным временем на монтаж, настройку и программирование.

В качестве датчиков скорости положения выступают абсолютные энкодеры.

В серводвигатель Siemens 1PH7 228 интегрирован абсолютный энкодер Heidenhain ECN 413, соединенный с контроллером посредством собственного интерфейса EnDat 2.2.

Энкодер ECN 413 обладает 8192 позициями и способен работать на скорости вала двигателя до 12000 оборотов в минуту с погрешностью  $\pm 20''$ . Напряжение питания составляет 3,6-14 В, потребляемый ток 85 мА и мощность 600-700 мВт [23].

Этот энкодер является основным, по его данным идет управление технологическим процессом.

Heidenhain ECN 413 изображен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Абсолютный энкодер Heidenhain ECN 413

На редукторе установлен второй абсолютный энкодер Fraba 5813-4096, который является вспомогательным энкодером, служащим для проверки правильности работы основного, сверяя получаемые данные. Fraba 5813-4096 соединяется с контроллером посредством интерфейса Profibus.

Энкодер Fraba 5813-4096 обладает 4096 позициями, напряжение питания составляет 10-30 В, потребляемый ток 280 мА.

Fraba 5813-4096 изображен на рисунке 2.5.

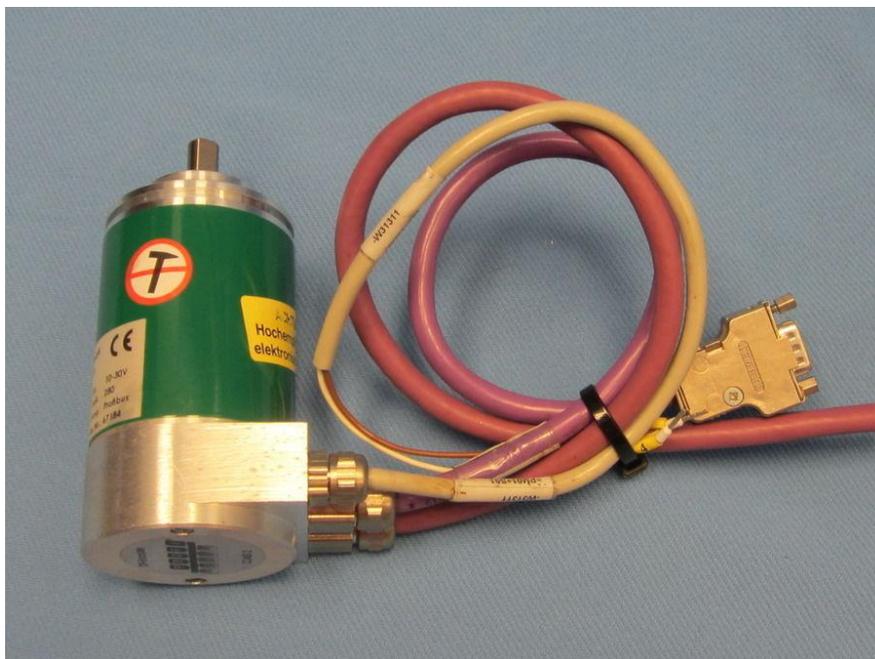


Рисунок 2.4 – Абсолютный энкодер Fraba 5813-4096

В качестве светового барьера используются датчики Telco SMT 8000 MG J в качестве источника и SMR 8500 PG J как приемник.

Приемник был выбран исходя из дистанции считывания сигнала, которая не должна намного превышать максимальный диаметр трубы.

Напряжение питания SMT 8000 MG J составляет от 10 до 30 В постоянного тока, потребляемый ток 15 мА, дистанция излучения сигнала 20 м.

Напряжение питания SMR 8500 PG J составляет от 10 до 30 В постоянного тока, потребляемый ток 5 мА, дистанция считывания сигнала 7 м.

Датчик-источник светового барьера представлен на рисунке 2.5.

Датчик-приемник светового барьера представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.5 – Источник сигнала Telco SMT 8000 MG J



Рисунок 2.6 – Приемник сигнала Telco SMT 8500 PG J

Для обеспечения остановки тележки на границах рельс используются концевые выключатели XCK-J10513H29 SCHNEIDER TELEMECANIQUE.



Рисунок 2.7 – Концевой выключатель XCK-J10513H29

## 2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата

Исходя из особенностей технологического процесса и требований, предъявляемых к мехатронной системе, регулируемые технологическими координатами будут являться скорость и положение клещевой тележки.

Для удовлетворения требований, связанных с регулированием скорости и положения клещевой тележки, наиболее целесообразным принципом управления данной системой будет являться скалярный метод частотного управления с замкнутой системой регулирования по скорости и положению.

Скалярному управлению асинхронного электропривода свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных асинхронного двигателя.

Для достижения необходимых статических и динамических свойств асинхронного электропривода необходима замкнутая система регулирования его технологических координат.

Управляющим воздействием на входе САР станет сигнал задания на регулятор положения. Основным возмущающим воздействием является момент сил сопротивления перемещению клещевой тележки. Входными сигналами датчиков являются угловая скорость вала двигателя и перемещение тележки.

На рисунке 2.7 представлена функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) электропривода клещевой тележки механического экспандера. Для регулирования положения клещевой тележки используют трехконтурную систему регулирования.

Управление технологическими координатами организовано по принципу подчиненного регулирования.

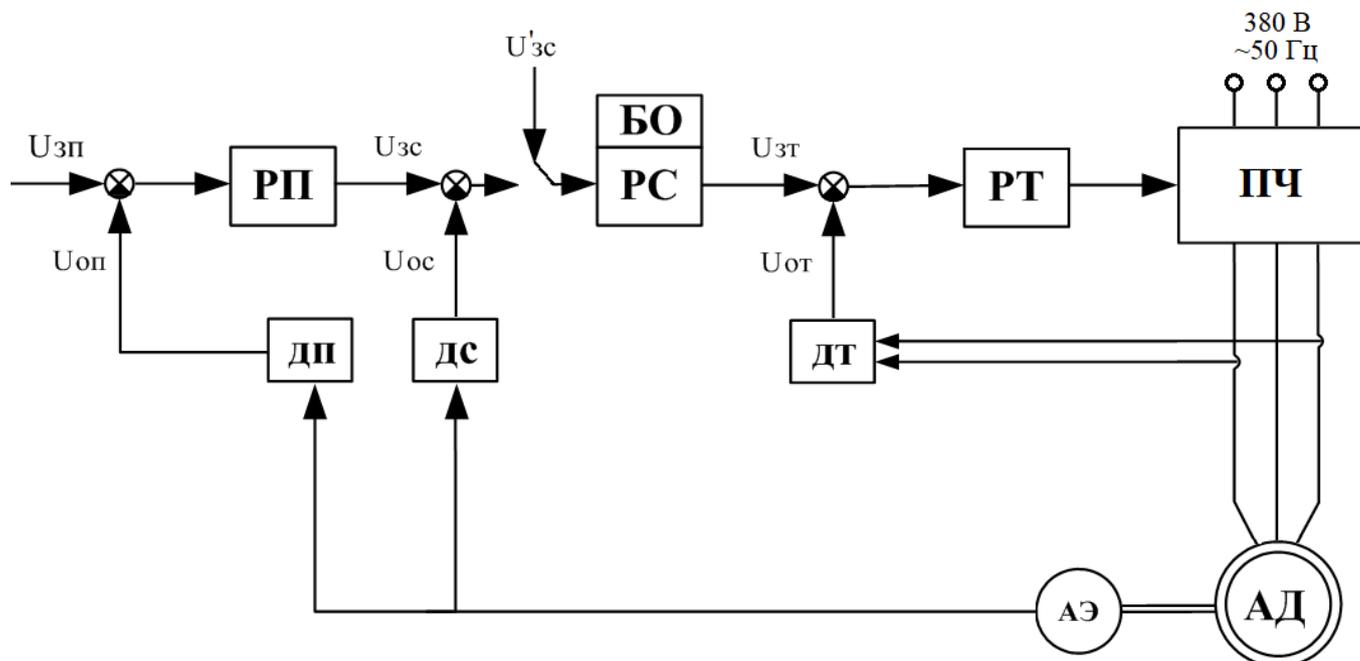


Рисунок 2.8 – Функциональная схема САР электропривода перемещения клещевой тележки механического экспандера: где ПЧ – преобразователь частоты, АД – асинхронный электродвигатель, АЭ – абсолютный энкодер, ДТ – датчик тока, ДС – датчик скорости, ДП – датчик положения, РП – регулятор положения, РС – регулятор скорости, БО – блок ограничения, РТ – регулятор тока.

## 2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

Во время технологического процесса возникает необходимость неоднократного перемещения клещевой тележки с трубой на определенные расстояния (шаги экспандирования), зависящие от длины трубы.

Регулятором технологических координат в системе автоматизированного управления перемещением клещевой тележки является регулятор положения.

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

В составе структурной схемы автоматического управления приводом клещевой тележки присутствует оптимизированный контур управления

моментом, представляющий собой преобразователь частоты, цепь статора электродвигателя и регулятор момента, настраиваемый на модульный оптимум.

Оптимизированный контур момента является колебательным звеном с временными характеристиками, соответствующими настройке контура на модульный оптимум.

Поскольку минимальная некомпенсируемая постоянная времени  $T_\mu$  мала, влиянием квадратичного члена в знаменателе на переходный процесс можно пренебречь, таким образом упростив передаточную функцию оптимизированного контура момента до апериодического звена первого порядка.

На рисунке 2.8 изображены колебательное (а) и апериодическое (б) звено оптимизированного контура момента.

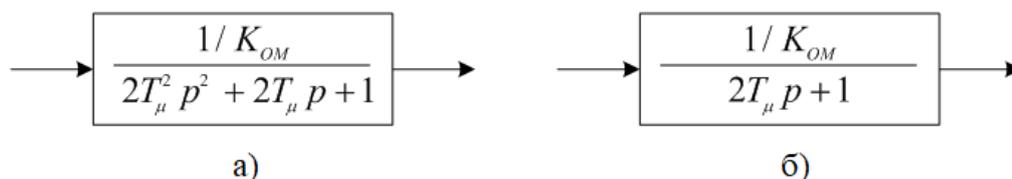


Рисунок 2.9 – Оптимизированный контур момента

Минимальной некомпенсируемой постоянной времени  $T_\mu$  обладает преобразователь частоты как наиболее быстродействующее устройство в системе преобразователь частоты–асинхронный электродвигатель.

Примем значение  $T_\mu$  равное 2 мс или 0.002 с.

$K_{OM}$  является коэффициентом обратной связи по моменту и рассчитывается по формуле:

$$K_{OM} = \frac{U_{з. max}}{M_{max}} = \frac{10}{977 \cdot 2,5} = 0,0040942, \quad (2.1)$$

где  $U_{з.маx}$  – максимальный уровень сигнала задания, В;

$M_{маx}$  – максимальный момент двигателя, Н·м.

Рассчитаем другие коэффициенты обратной связи.

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{OC} = \frac{U_{з.маx}}{\omega_{маx}} = \frac{10}{135,46} = 0,0738225, \quad (2.2)$$

где  $\omega_{маx}$  – максимальная угловая скорость двигателя, рад/с.

Коэффициент обратной связи по положению:

$$K_{OP} = \frac{U_{з.маx}}{s_{маx}} = \frac{10}{7,6} = 1,3158, \quad (2.3)$$

где  $s_{маx}$  – максимальное перемещение клещевой тележки, м.

Коэффициент на линейное перемещение, учитывающий параметры редуктора в кинематической схеме механизма:

$$K_{И} = \frac{d/2}{i} = \frac{0,114}{21,3} = 0,005352. \quad (2.4)$$

Регулятор скорости используется для управления скоростью вращения вала электродвигателя.

Выберем в качестве регулятора пропорциональное звено.

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{PC} = \frac{J_{min}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{OC} / K_{OM}} = \frac{3,1 \cdot 0,004094}{4 \cdot 0,002 \cdot 0,0738225} = 21,48972, \quad (2.5)$$

где  $J_{\min}$  – минимальный момент инерции системы,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Регулятор перемещения используется для управления положением клещевой тележки.

Для достижения необходимой точности перемещения применим нелинейный трехзонный регулятор положения.

В нелинейном регуляторе положения используется различный коэффициент усиления в зависимости от значения входного сигнала ошибки.

Рассчитаем границы зон:

$$\Delta U_{\Pi \max} = \frac{\omega^2 \cdot K_{\text{ОП}} \cdot K_{\text{И}}}{2 \cdot \varepsilon} = \frac{135,46^2 \cdot 1,3158 \cdot 0,005352}{2 \cdot 342,85} = 0,188449 \text{ В.} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Pi \min} &= 2 \cdot \varepsilon \cdot K_{\text{ОП}} \cdot K_{\text{И}} \cdot (16 \cdot T_{\mu})^2 = \\ &= 2 \cdot 342,85 \cdot 1,3158 \cdot 0,005352 \cdot (16 \cdot 0,002)^2 = 0,0049447 \text{ В.} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Рассчитаем коэффициенты для перемещений в различных зонах регулирования:

$$K_{\text{мал}} = \frac{K_{\text{ОС}}}{16 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{И}} \cdot K_{\text{ОП}}} = \frac{0,0738225}{16 \cdot 0,002 \cdot 0,005352 \cdot 1,3158} = 327,59. \quad (2.8)$$

$$K_{\text{ср}} = K_{\text{ОС}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon}{K_{\text{ОП}} \cdot K_{\text{И}}}} = 0,0738225 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 342,85}{1,3158 \cdot 0,005352}} = 23,0357751. \quad (2.9)$$

$$K_{\text{бол}} = 10. \quad (2.10)$$

На рисунке 2.9 и 2.10 представлены общий вид структурной схемы САР клещевой тележки и ее математическая модель соответственно.

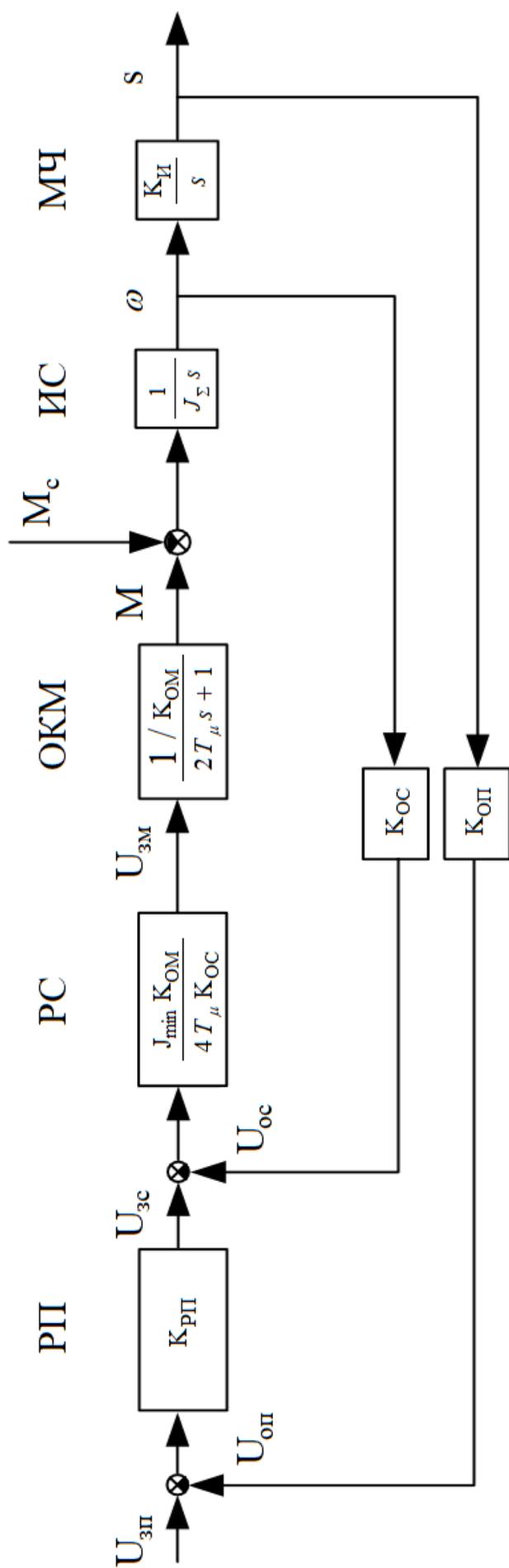


Рисунок 2.10 – Структурная схема системы автоматического регулирования клещевой тележки: где РП – регулятор положения, РС – регулятор скорости, ОКМ – оптимизированный контур момента, ИС – инерционность системы привода, МЧ – механическая часть привода.

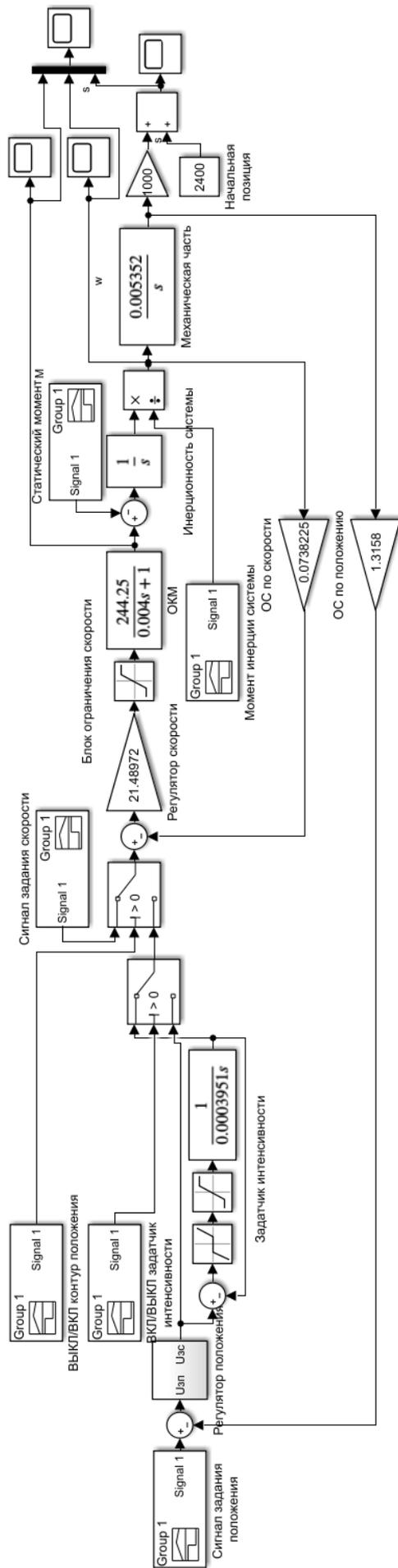


Рисунок 2.11 – Математическая модель электропривода клещевой тележки

Математическая модель электропривода перемещения клещевой тележки реализована посредством программного обеспечения Matlab Simulink.

Типовым режимом работы данной САР является режим больших перемещений, поскольку скорость и момент двигателя успевают достичь установившихся значений.

На рисунках 2.12 и 2.14 представлены графики отработки сигнала задания положения спроектированный контуром САР.

На рисунках 2.13 и 2.15 представлены приближенные графики изменения момента и скорости двигателя.

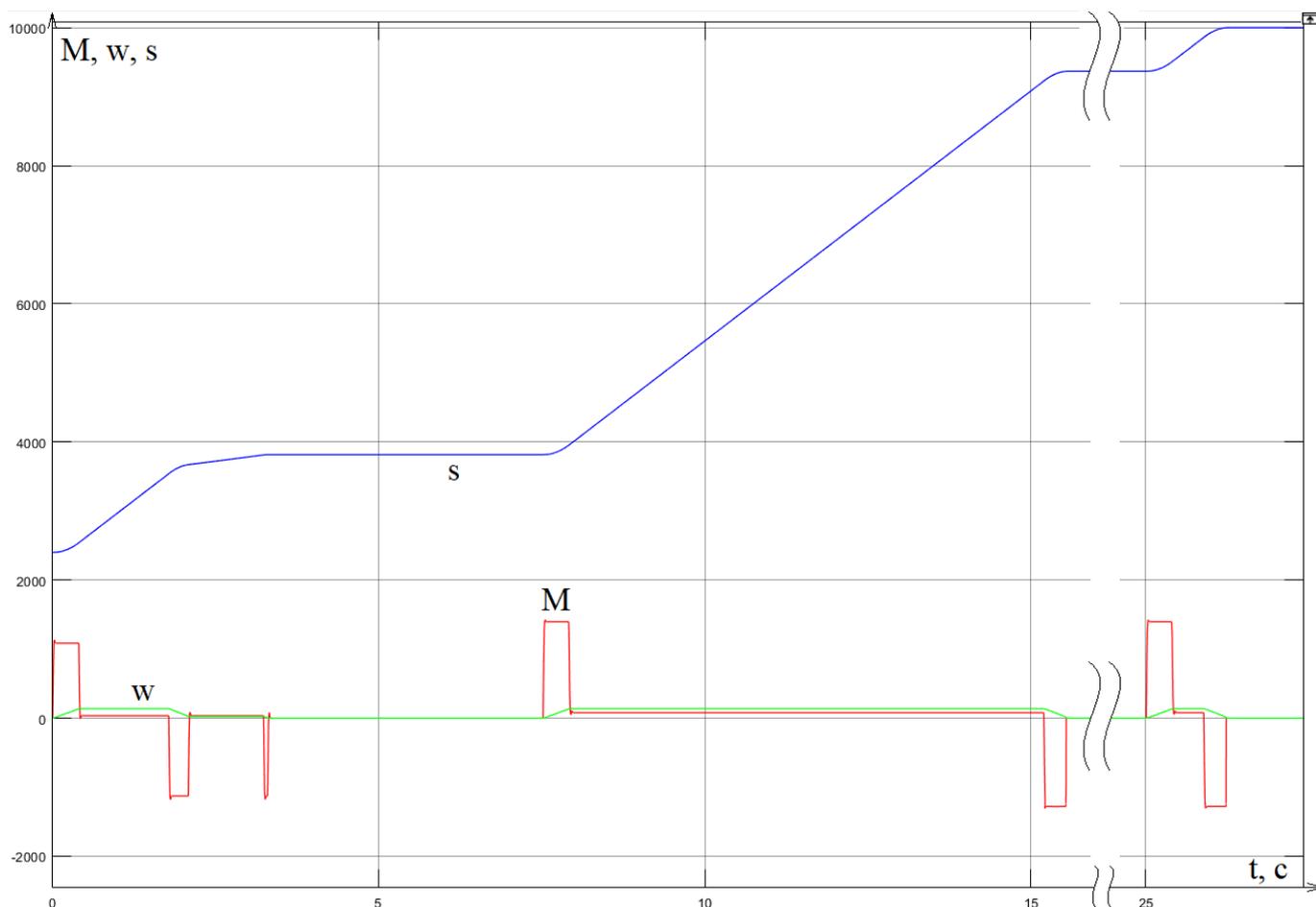


Рисунок 2.12 – Обработка сигнала задания в начале техпроцесса

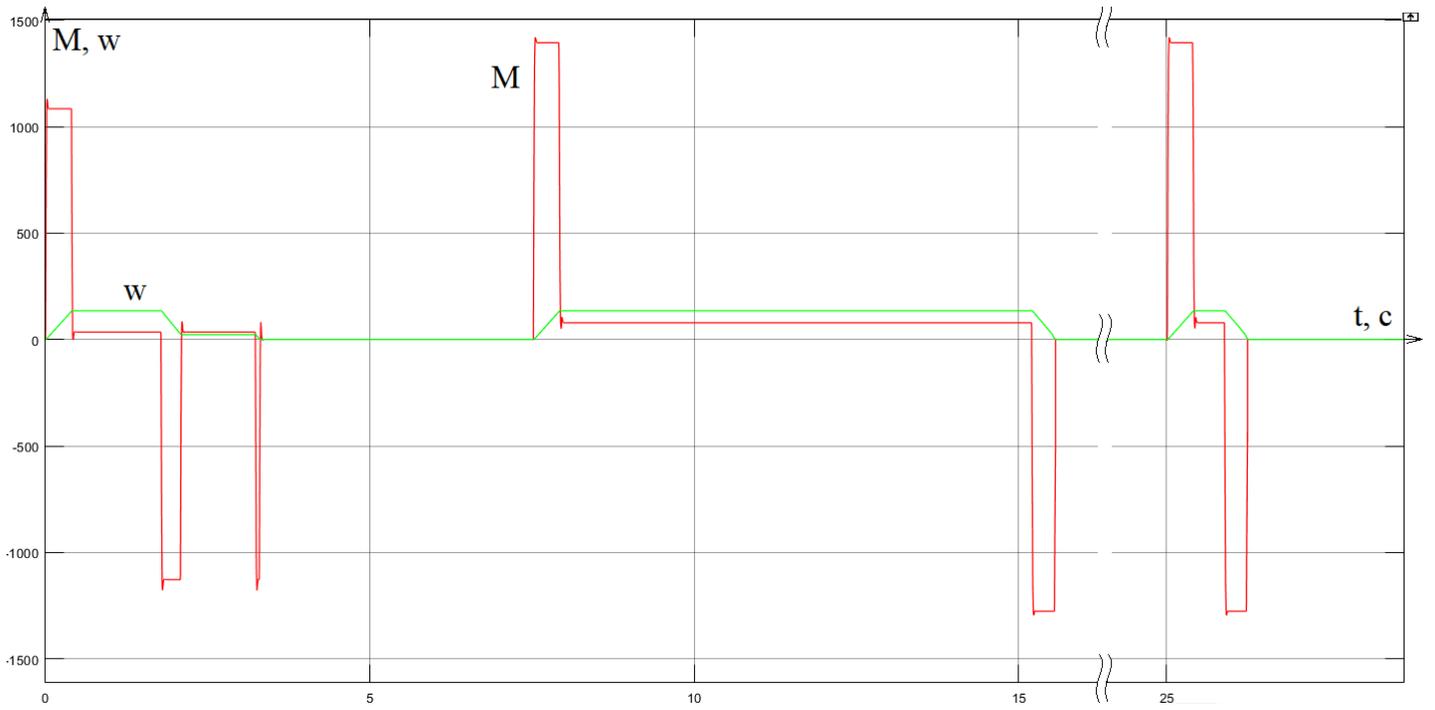


Рисунок 2.13 – Приближенный график момента и скорости двигателя в начале техпроцесса

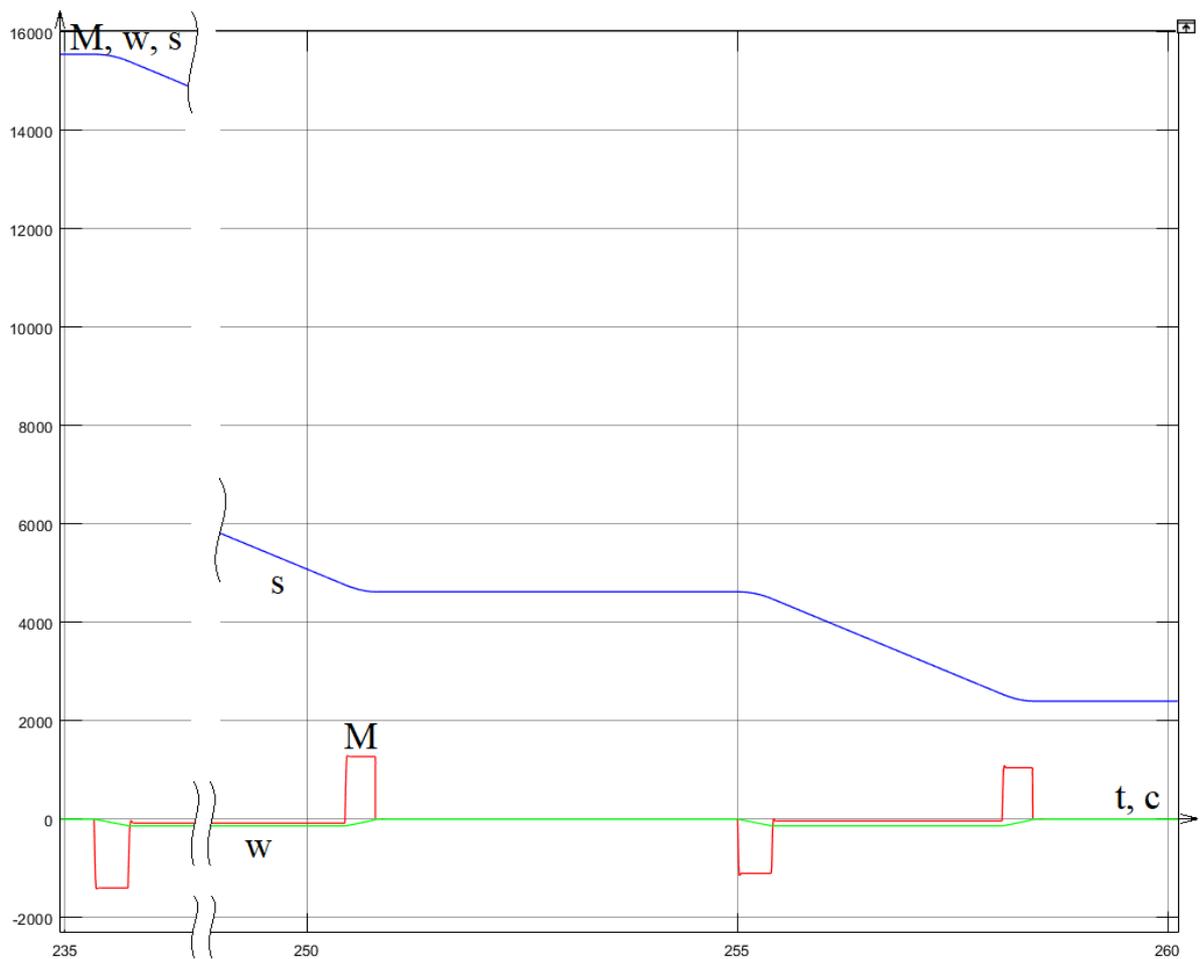


Рисунок 2.14 – Отработка сигнала задания в конце техпроцесса

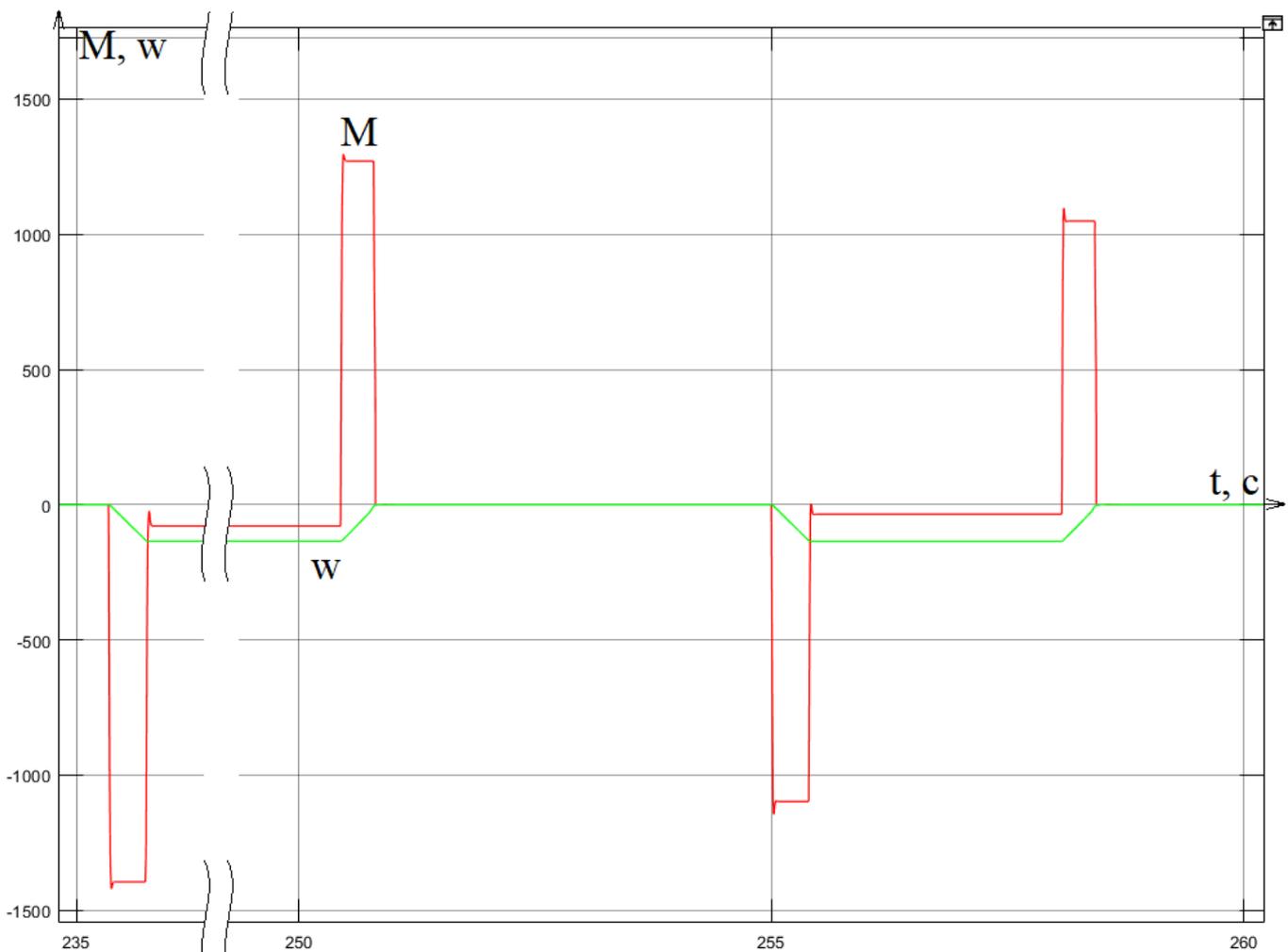


Рисунок 2.15 – Приближенный график момента и скорости двигателя в конце техпроцесса

Проанализировав графики можно сделать вывод, что они аналогичны тахограмме и нагрузочной диаграмме привода.

Также графики позволяют получить представление о переходных процессах в системе электропривода.

### 3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

#### 3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции

Цех "Высота 239" является одним из крупнейших цехов по производству труб большого диаметра в России. На производстве задействованы современное оборудование и высококвалифицированные специалисты. Ежегодно цех способен производить по 900 000 тонн труб большого диаметра.

Оборудование "Высоты 239" позволяет изготавливать одношовные сварные трубы большого диаметра до 1420 мм, с толщиной стенки до 48 мм и длиной 12 и 18 метров, с наружным и внутренним покрытием.

Изделия "Высоты 239" являются высококлассной продукцией, способной удовлетворить любые требования потребителя и эксплуатироваться в неблагоприятных условиях, будь то суровый климат, сейсмическая активность или прокладка по дну моря.

#### 3.2 Расчет производственной программы цеха

##### 3.2.1 Расчет фактического рабочего фонда рабочего времени

Поскольку работа клещевой тележки неотрывно связана с функционированием механического экспандера, составим баланс времени работы всей установки целиком: рассчитаем номинальное и фактическое время ее работы.

Поскольку экспандер находится в эксплуатации круглый год, его календарное время работы  $T_{\text{кал}}$  составит 8760 ч.

Формула номинального времени работы установки:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{кр}} - T_{\text{тр}} = 8760 - 32 - 18 = 8710 \text{ ч}, \quad (3.1)$$

где  $T_{кр}$  – время, потраченное на капитальные ремонты;

$T_{тр}$  – время, потраченное на текущие ремонты.

Фактическое время работы:

$$T_{ф1} = T_{ном} - T_{тр} = 8710 - 17 = 8693 \text{ ч}, \quad (3.2)$$

где  $T_{пр}$  – время всех простоев установки.

В ходе реконструкции ожидается снижение времени простоев примерно на 8 часов за счет замены инкрементального энкодера на абсолютный.

Фактическое время работы после реконструкции:

$$T_{ф2} = T_{ном} - (T_{пр} - 8) = 8710 - (17 - 8) = 8701 \text{ ч}. \quad (3.3)$$

### 3.2.2 Расчет производительности оборудования

Известно, что номинальная производительность экспандера при экспандировании трубы диаметром 1020 мм, длиной 12 м и толщиной стенки 27 мм составляет 14 шт/ч.

Годовой объем выпущенной продукции или производственная программа определяется фондом фактического рабочего времени и производительностью агрегата.

До реконструкции:

$$W_1 = P \cdot T_{ф1} = 14 \cdot 8693 = 121702 \text{ шт / год}, \quad (3.4)$$

где  $P$  – производительность установки, шт/ч.

После реконструкции:

$$W_2 = P \cdot T_{ф2} = 14 \cdot 8701 = 121814 \text{ шт / год.} \quad (3.5)$$

Результаты расчета производственной программы цеха представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Производственная программа цеха

Показатель	Величина	
	До реконструкции	После реконструкции
Календарное время, ч	8760	8760
Планово-предупредительные ремонты, ч	18	18
Капитальный ремонт, ч	32	32
Номинальное рабочее время, ч	8710	8710
Текущие простои, ч	17	9
Фактическое время работы, ч	8693	8701
Часовая производительность, шт/ч	14	14
Годовая производительность, шт/год	121702	121814

### 3.3 Расчет сметы капитальных затрат

#### 3.3.1 Расчет стоимости приобретенного оборудования

Перечень устанавливаемого и демонтируемого оборудования устанавливается на основании техзадания.

Цены на оборудование принимаются из прейскуранта цен, предоставляемого производителем.

Расчет стоимости приобретенного оборудования представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Оптовая цена за единицу, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.
Приобретаемое оборудование			
АЭ OCD-SL00G-1213-C100-PRL POSITAL FRABA	1	11,3	11,3
Прочее неучтенное оборудование	10%	–	1,13
Итого стоимость оборудования	–	–	12,43
Демонтируемое оборудование			
ИЭ RHI503 57 LEINE&LINDE	1	13,593	13,593
Прочее неучтенное оборудование	10%	–	1,3593
Итого стоимость оборудования	–	–	14,9523

Совокупная стоимость неучтенного оборудования (проводка, кабели, иное мелкое оборудование) берется в размере 10% от стоимости учтенного оборудования.

### 3.3.2 Расчет затрат на монтаж оборудования

Монтаж приобретенного оборудования осуществляется собственными цеховыми инженерами СПА (службы промышленной автоматизации). К затратам на монтаж также относятся доплата по районному коэффициенту, плановые накопления и накладные расходы.

Расчет затрат приведен для абсолютного энкодера OCD-SL00G-1213-C100-PRL POSITAL FRABA, для инкрементального энкодера RHI503 57 LEINE&LINDE порядок вычислений идентичен.

Поскольку монтаж осуществляется не подрядной строительной-монтажной организацией, а собственной службой промышленной автоматизации, рассчитаем затраты на монтажные работы.

Рабочая смена инженера СПА составляет 3200 рублей, временные затраты на монтаж энкодера составляют 1 час.

Таким образом затраты на монтаж составляют:

$$\text{графа2} = \frac{3,2 \cdot 1}{8} = 0,4 \text{ тыс.руб.} \quad (3.6)$$

Для учета надбавок к заработной плате в связи с неблагоприятными условиями работ вводят следующие мультипликативные коэффициенты:

– коэффициент, связанный с монтажными работами в эксплуатируемых зданиях, действующих цехах, производственных участках с нагромождениями оборудования и движением транспорта, равный 1,1;

– коэффициент, связанный с работой вблизи объектов под высоким напряжением, равный 1,2.

Затраты на монтаж с дополнительными коэффициентами:

$$\text{графа3} = 0,4 \cdot 1,1 \cdot 1,2 = 0,528 \text{ тыс.руб.} \quad (3.7)$$

Доплата по районному коэффициенту рассчитывается исходя из действующего районного коэффициента на зарплату. Для Южного Урала этот коэффициент равен 0,15.

Доплата по районному коэффициенту:

$$\text{графа4} = 0,528 \cdot 0,15 = 0,0792 \text{ тыс.руб.} \quad (3.8)$$

Поскольку учитывается дополнительный коэффициент, расчет сумма косвенных расходов не производится.

Накладные расходы на монтаж электрооборудования составляют 87 % от скорректированной заработной платы монтажников.

Накладные расходы составляют:

$$\text{графа5} = (0,0792 + 0,528) \cdot 0,87 = 0,52826 \text{ тыс.руб.} \quad (3.9)$$

Себестоимостью монтажа является совокупность расходов на монтажные работы и накладных расходов.

Итого себестоимость монтажа:

$$\text{графа6} = 0,528 + 0,0792 + 0,52826 = 1,13546 \text{ тыс.руб.} \quad (3.10)$$

Поскольку монтаж проводит собственная служба промышленной автоматизации, расчет плановых накоплений, образующих прибыль монтажной организации, не проводится.

Таким образом, себестоимость монтажа является затратами на весь объем работ.

Затраты на неучтенное оборудования составляют 20% от затрат на монтаж учтенного оборудования.

Итого затраты на монтаж всего нового оборудования:

$$M = 1,13546 \cdot 0,2 + 1,13546 = 1,36255 \text{ тыс.руб.} \quad (3.11)$$

Расчет затрат на монтаж оборудования представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет расходов на монтаж оборудования

Наименование монтируемого оборудования	Основная зарплата за монтаж, тыс. руб.	Зарплата с прочими коэффициентами, тыс. руб.	Доплата по районному коэффициенту на зарплату, тыс. руб.	Накладные расходы, тыс. руб.	Себестоимость монтажа, тыс. руб.	Заграт на весь объем работ, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
АЭ OCD-SL00G-1213-C100-PRL	0,4	0,528	0,0792	0,52826	1,13546	1,13546
Прочее неучтенное оборудование	–	–	–	–	–	0,22709
ИТОГО для нового оборудования	–	–	–	–	–	1,36255
ИЭ RHI503 57 LEINE&LINDE	0,4	0,528	0,0792	0,52826	1,13546	1,13546
Прочее неучтенное оборудование						0,22709
ИТОГО для старого оборудования						1,36255

### 3.3.3 Расчет затрат на запасные части

Затраты на запасные части берутся в размере 2-3% от общей стоимости оборудования, приведенной в таблице 3.2.

Для нового оборудования:

$$ЗЧ_{\text{н}} = 12,43 \cdot 0,03 = 0,3729 \text{ тыс.руб.} \quad (3.12)$$

Для старого оборудования:

$$ЗЧ_{\text{с}} = 14,9523 \cdot 0,03 = 0,44857 \text{ тыс.руб.} \quad (3.13)$$

### 3.3.4 Расчет величины транспортных расходов

Транспортные расходы составляют 3,3% стоимости оборудования и запасных частей.

Для нового оборудования:

$$Т_{\text{н}} = (12,43 + 0,3729) \cdot 0,033 = 0,4225 \text{ тыс.руб.} \quad (3.14)$$

Для старого оборудования:

$$Т_{\text{с}} = (14,9523 + 0,44857) \cdot 0,033 = 0,50823 \text{ тыс.руб.} \quad (3.15)$$

### 3.3.5 Расчет величины заготовительно-складских расходов

Заготовительно-складские расходы составляют 1,2% стоимости оборудования, запасных частей и транспортных расходов.

Для нового оборудования:

$$ЗС_{\text{н}} = (12,43 + 0,3729 + 0,4225) \cdot 0,012 = 0,1587 \text{ тыс.руб.} \quad (3.16)$$

Для старого оборудования:

$$ЗС_{\text{с}} = (14,9523 + 0,44857 + 0,50823) \cdot 0,012 = 0,19091 \text{ тыс.руб.} \quad (3.17)$$

### 3.3.6 Расчет расходов на комплектацию оборудования

Расходы на комплектацию оборудования составляют 0,5-1,5% стоимости оборудования и запасных частей.

Для нового оборудования:

$$КО_{\text{н}} = (12,43 + 0,3729) \cdot 0,015 = 0,19204 \text{ тыс.руб.} \quad (3.18)$$

Для старого оборудования:

$$КО_{\text{с}} = (14,9523 + 0,44857) \cdot 0,015 = 0,23101 \text{ тыс.руб.} \quad (3.19)$$

### 3.3.7 Расчет затрат на демонтаж, остаточной и ликвидационной стоимости

Затраты на демонтаж составляют 40% от стоимости монтажа оборудования.

$$Д_{\text{с}} = 1,36255 \cdot 0,4 = 0,54502 \text{ тыс.руб.} \quad (3.20)$$

Демонтируемое оборудование пригодно для дальнейшего использования на предприятии, поэтому ликвидационная и остаточная стоимости в расчетах не учитываются.

### 3.3.8 Расчет капитальных затрат

Таким образом, капитальные затраты на реконструкцию составляют:

$$K_{\text{н}} = 12,43 + 2,21702 + 0,3729 + 0,4225 + \\ + 0,1587 + 0,19204 + 0,54502 = 16,33818 \text{ тыс.руб.} \quad (3.21)$$

Капитальные затраты до реконструкции:

$$K_{\text{с}} = 14,9523 + 2,21702 + 0,44857 + 0,50823 + \\ + 0,19091 + 0,23101 = 18,54804 \text{ тыс.руб.} \quad (3.22)$$

### 3.4 Расчет РСЭО

Рассчитаем размер и состав расходов на содержание и эксплуатацию оборудования за год.

Расходы на эксплуатацию электрооборудования состоят из:

- затрат на электроэнергию (Э)
- амортизационных отчислений (А)
- затрат на ремонт и обслуживание (З)

Таким образом, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования вычисляются по следующей формуле:

$$C = Э + А + З. \quad (3.23)$$

#### 3.4.1 Расчет затрат на электроэнергию

Затраты на электроэнергию составляют произведение стоимости 1 кВт·ч энергии на количество потребляемой энергии в течение одного года.

Затраты на электроэнергию рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \frac{P_n \cdot T_{\phi} \cdot Ц_{\Theta}}{\eta}, \quad (3.24)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность электропривода, кВт;

$T_{\phi}$  – фактическое время работы электропривода, ч;

$Ц_{\Theta}$  – себестоимость 1 кВт·ч, руб;

$\eta$  – коэффициент полезного действия всего привода, рассчитанный в формуле 1.12.

Стоимость электроэнергии до реконструкции:

$$\Theta_c = \frac{179 \cdot 8693 \cdot 3,19}{0,88} = 5640,67037 \text{ тыс.руб.} \quad (3.25)$$

Стоимость электроэнергии после реконструкции:

$$\Theta_n = \frac{179 \cdot 8701 \cdot 3,19}{0,88} = 5645,86137 \text{ тыс.руб.} \quad (3.26)$$

### 3.4.2 Расчет амортизационных отчислений

Расчет годовой суммы амортизационных отчислений ведется исходя из капитальных затрат на оборудование и требуемой нормы амортизации.

Ежегодную норму амортизации в процентах от стоимости оборудования можно рассчитать по формуле:

$$H_a = \frac{100}{T_a} = \frac{100}{15} \approx 6,67\%, \quad (3.27)$$

где  $T_a$  – нормативный срок службы оборудования, равный 15 годам для нового и демонтируемого оборудования.

Ежегодная сумма амортизационных отчислений определяется по формуле:

$$A = \frac{K \cdot H_a}{100}. \quad (3.28)$$

Расчет амортизационных отчислений представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчет амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Капитальные затраты К, тыс. руб.	Норма амортизации $H_a$ , %	Сумма амортизации А, тыс. руб./год
1	2	3	4	5
Устанавливаемое оборудование				
АЭ АЭ OCD-SL00G-1213-C100-PRL POSITAL FRABA	1	16,33818	6,67	1,09466
Демонтируемое оборудование				
ИЭ RHI503 57 LEINE&LINDE	1	18,54804	6,67	1,23715

### 3.4.3 Расчет затрат на ремонт и обслуживание

В стоимость затрат на ремонт и обслуживание входит множество элементов, а именно:

- стоимость потребляемой энергии;
- стоимость необходимых материалов;
- стоимость запасных частей;
- стоимость используемого инструмента и инвентаря;
- заработная плата дежурного и ремонтного персонала.

Из всех этих элементов прямой расчет возможен лишь для заработной платы дежурного и ремонтного персонала.

Затраты на ремонт и обслуживания рассчитываются как произведение ежегодной суммы амортизации  $A$  и коэффициента  $k$ , отражающего долю затрат на содержание оборудования.

Для демонтируемого оборудования  $k$  составляет 0,9, для более совершенного нового оборудования  $k$  принимается равным 0,2.

Величина затрат на ремонт и обслуживание нового оборудования составит:

$$Z_H = k_H \cdot A_H = 0,2 \cdot 1,09466 = 0,21893 \text{ тыс.руб.} \quad (3.29)$$

Для старого оборудования:

$$Z_C = k_C \cdot A_C = 0,9 \cdot 1,23715 = 1,11343 \text{ тыс.руб.} \quad (3.30)$$

Таким образом, по формуле 3.26 вычислим сумму расходов на содержание и эксплуатацию оборудования за год для устанавливаемого и демонтируемого оборудования.

Для устанавливаемого оборудования:

$$C_H = \mathcal{E}_H + A_H + Z_H = 5645,86137 + 1,09466 + 0,21893 = 5647,17532 \text{ тыс.руб.} \quad (3.31)$$

Для демонтируемого оборудования:

$$C_C = \mathcal{E}_C + A_C + Z_C = 5640,67037 + 1,23715 + 1,11343 = 5643,02095 \text{ тыс.руб.} \quad (3.32)$$

### 3.5 Расчет фонда оплаты труда и страховых отчислений

Численность персонала цеха "Высота 239" составляет 895 человек.

Средняя заработная плата по цеху  $\approx 45$  тыс. руб.

Тогда годовой фонд оплаты труда с учетом премий составляет:

$$\text{ФОТ} = 895 \cdot 45 \cdot 1,3 = 52357,5 \text{ тыс. руб.} \quad (3.33)$$

В 2018 году на территории Российской Федерации сумма страховых отчислений составляет 30% [24], из которых:

- 22% составляют отчисления в Пенсионный фонд;
- 2,9% в Фонд социального страхования;
- 5,1% в Фонд медицинского страхования.

Итоговая сумма страховых отчислений:

$$\Phi_{\text{страх.выпл.}} = 52357,5 \cdot 0,3 = 15707,25 \text{ тыс. руб.} \quad (3.34)$$

### 3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности

Любое производство ориентировано на получение прибыли, которая является важнейшим показателем эффективности работы предприятия.

Итогом реконструкции является увеличение фактического времени работы установки. Прирост прибыли происходит за счет реализации продукции, произведенной за время уменьшения простоев агрегата.

С производительностью 14 шт/ч и уменьшением простоев на 8 часов по итогам реконструкции годовой прирост продукции составит:

$$\Delta W = 14 \cdot 8 = 112 \text{ шт.} \quad (3.35)$$

Масса одной трубы диаметром 1020 мм, длиной 12 м и толщиной стенки 27 мм составляет приблизительно 8 тонн.

Годовой прирост продукции в тоннах:

$$\Delta Q = \Delta W \cdot m = 112 \cdot 8 = 896 \text{ т,} \quad (3.36)$$

где  $m$  – масса одной трубы, т.

Прирост прибыли от реализации продукции за счет увеличения производительности установки определяется по формуле:

$$\Delta \text{Пр} = \Delta Q \cdot (C_p - C) = 896 \cdot (53230 - 50366) = 2566,144 \text{ тыс.руб,} \quad (3.37)$$

где  $C_p$  – цена реализации тонны продукции, руб./т;

$C$  – себестоимость тонны продукции, руб./т.

Прирост чистой прибыли составит:

$$\Delta \text{Пч} = \Delta \text{Пр} - Н = 2566,144 - 2566,144 \cdot 0,2 = 2052,915 \text{ тыс.руб,} \quad (3.38)$$

где  $H$  – налог на прибыль, составляющий 20% от суммы прибыли, тыс. руб.

Таким образом, рентабельность продукции составит:

$$R_{\text{прод}} = \frac{C_p - C}{C} \cdot 100\% = \frac{53230 - 50366}{50366} \cdot 100\% = 5,69\%. \quad (3.39)$$

### 3.7 Расчет срока окупаемости проекта

Сроком окупаемости называется отрезок времени, после которого доход от проекта сравнивается с суммой затраченных на него средств [25].

Поскольку инвестиции осуществляются лишь один раз в самом начале, и прибыль от проведенного проекта будет поступать равными частями, применим для расчета простой метод окупаемости.

Формула расчета срока окупаемости простым методом:

$$CO = \frac{K_n}{\Delta \text{Пч} \cdot r} = \frac{16,33818}{2052,915 \cdot 0,01} = 0,79585 \text{ года,} \quad (3.40)$$

где  $r$  – приблизительная доля клещевой тележки в создании прибыли.

Срок окупаемости проведенной реконструкции составит 0,79585 года, или 9,55 месяца.

### 3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчетов

Сводная технико-экономическая характеристика реконструируемой системы электропривода перемещения клещевой тележки установки механического экспандера представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сводная таблица технико-экономических расчетов

Показатель	Значение показателя	
	До реконструкции	После реконструкции
Годовой объем производства, т	973616	974512
Капитальные затраты, тыс. руб.	18,54804	16,33818
Эксплуатационные затраты, тыс. руб./г:		
всего	5643,02095	5647,17532
в том числе:		
электроэнергия	5640,67037	5645,86137
амортизация	1,23715	1,09466
текущий ремонт и содержание оборудования	1,11343	0,22374
Себестоимость единицы продукции, руб./т		50366
Прирост чистой прибыли, тыс. руб./г.		2052,915
Фонд оплаты труда, тыс. руб./г.		52357,5
Срок окупаемости, месяцев		9,55

Таким образом, данные таблицы 3.5 позволяют сделать выводы, что применение данного проекта позволит увеличить годовой объем производства, снизит эксплуатационные затраты и себестоимость тонны продукции.

Поэтому проект является прибыльным и допустимым к реализации на производстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка привода движения механизма является одной из основных задач промышленного проектирования.

Процесс разработки начинается с описания технологического процесса работы механизма, к которому производится расчет привода, характеристик и кинематической схемы механизма, на основе чего предъявляются требования к системам привода и автоматизации.

С учетом предъявленных требований выбирается система привода, из условий технологического процесса производится приблизительный расчет мощности и предварительный выбор двигателя.

На следующем этапе ведется расчет и построение тахограммы и нагрузочной диаграммы привода, которые позволяют количественно и визуально оценить скорость двигателя и нагрузку на нем на протяжении всего цикла работы.

По данным диаграмм производится проверка привода на перегрев и перегрузку.

Далее происходит выбор основного силового оборудования (преобразователь частоты) и защиты привода от аварийных режимов.

В следующей части работы происходит разработка архитектуры автоматизации для управления электроприводом, выбор управляющего контроллера и датчиков технологических координат для контроля необходимых параметров технологического процесса.

После этого проводится выбор функциональной системы автоматического регулирования привода, разработка контура регулирования технологических координат и моделирования переходных процессов электропривода.

Разработанные привод и САР удовлетворяют всем требованиям технологического процесса механизма.

В заключительной части работы происходит расчет технико-экономических показателей реконструкции агрегата.

Была дана краткая характеристика цеха и выпускаемой им продукции, произведен расчет производственной программы цеха, включающей в себя расчет фактического годового фонда рабочего времени и производительность оборудования.

Далее осуществляются расчеты сметы капитальных затрат на реконструкцию, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования и фонда оплаты труда со страховыми отчислениями.

На основе прироста годового объема производства цеха, полученного благодаря увеличению фактического рабочего времени агрегата, производится расчет прироста прибыли и рентабельности цеха, а также срока окупаемости проекта.

В конце работы происходит составление сводной таблицы технико-экономических расчетов, куда включаются основные данные, отображающие итоговый эффект от проведенной реконструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Андреев, В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – Изд. 2-е, перераб. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
- 2 Цех "Высота 239" Челябинского трубопрокатного завода. – [http://www.chelpipe.ru/about/investment\\_projects/height\\_239/](http://www.chelpipe.ru/about/investment_projects/height_239/)
- 3 Инструкция по эксплуатации. – SMS group, 2008. – 293 с.
- 4 Шаговый двигатель, серводвигатель: преимущества и недостатки. – [http://www.cnccontrollers.ru/shagovye\\_dvigateli.html](http://www.cnccontrollers.ru/shagovye_dvigateli.html)
- 5 Сервопривод или шаговый двигатель – что выбрать, отличие. – <https://darxton.ru/wiki-article/vybor-shagovye-ili-servodvigateli/>
- 6 Расчет привода перемещения тележки. – [http://alexfl.pro/inform/inform\\_raschet31.html](http://alexfl.pro/inform/inform_raschet31.html)
- 7 Ключев, В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. / В.И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: с ил.
- 8 Продолжительность включения. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Продолжительность\\_включения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Продолжительность_включения)
- 9 Выбор преобразователя частоты для электродвигателя. Основные моменты. – <https://tehprivod.ru/poleznaya-informatsiya/vybor-preobrazovatelya-chastoty.html>
- 10 Выбор частотных преобразователей, диапазон регулирования частоты. – <http://chistotnik.ru/vybor-chastotnyx-preobrazovatelej.html>
- 11 Выбор преобразователя частоты. Общие рекомендации. – [http://powergroup.com.ua/vybor\\_preobrazovatelya\\_chastoti](http://powergroup.com.ua/vybor_preobrazovatelya_chastoti)
- 12 Sinamics G120 Siemens. – [https://www.siemens-pro.ru/components/sinamics\\_g120.html](https://www.siemens-pro.ru/components/sinamics_g120.html)
- 13 Частотный преобразователь (электропривод). – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Частотный\\_преобразователь\\_\(электропривод\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Частотный_преобразователь_(электропривод))
- 14 Короткое замыкание. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Короткое\\_замыкание](https://ru.wikipedia.org/wiki/Короткое_замыкание)

15 Защита электродвигателей, схема защиты асинхронных электродвигателей. – [http://remont220.ru/zashita\\_dvig.php](http://remont220.ru/zashita_dvig.php)

16 Входные и выходные фильтры частотных преобразователей – Элементы автоматики – Каталог статей – Азбука КИП. – [http://azbukakip.ru/publ/ehlementy\\_avtomatiki/vkhodnye\\_i\\_vykhodnye\\_filtry\\_chastotnykh\\_preobrazovatelej/3-1-0-12](http://azbukakip.ru/publ/ehlementy_avtomatiki/vkhodnye_i_vykhodnye_filtry_chastotnykh_preobrazovatelej/3-1-0-12)

17 Уровни АСУ ТП. – [http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/9\\_\\_\\_\\_.html](http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/9____.html)

18 MES. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/MES>

19 Siemens S7-400 Программируемый контроллер. – <https://www.siemens-pro.ru/components/s7-400.htm>

20 Simatic S7-400. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Simatic\\_S7-400](https://ru.wikipedia.org/wiki/Simatic_S7-400)

21 CPU 414-2, CPU 414-3, CPU 414-3 PN/DP – CPU для SIMATIC S7-400. – <http://siemens.el-complex.com/index.php?tree=1000000&tree2=10007430&tree3=9309999&tree4=10021868&tree5=10036892&tree6=10036893>

22 Станция систем распределенного ввода-вывода ET 200S для установки в шкафы управления. – <https://www.siemens-pro.ru/components/et200s.htm>

23 Датчик вращения ECN 413 Производства Heidenhain Германия. – [http://ria-groupp.com.ua/heidenhain/rotornye\\_s\\_podshypnikom\\_dlya\\_vala/201/](http://ria-groupp.com.ua/heidenhain/rotornye_s_podshypnikom_dlya_vala/201/)

24 Налоги с ФОТ (фонда оплаты труда) в 2018 году: ставки, таблица. – <http://finansiko.ru/kakie-nalogi-est-s-fot-v-2016-godu/>

25 Срок окупаемости: формулы и методы расчета, пример. – <http://businessmens.ru/article/srok-okupaemosti-formula-i-metody-rascheta-primer>