

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

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

\_\_\_\_\_ В.Р. Гасияров

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА  
ЮУрГУ 15.03.06.2020.151 ПЗ (ВКР)

Модернизация мехатронной системы толкателя методической печи

Консультант по экономике  
Профессор, д.э.н.

\_\_\_\_\_ Е.В. Кучина

Нормоконтролер  
Преподаватель

\_\_\_\_\_ О.А. Гасиярова

Консультант по проверке ВКР на  
оригинальность  
Ст. преподаватель

\_\_\_\_\_ С.С. Воронин

Руководитель работы  
Преподаватель

\_\_\_\_\_ Т.А. Лисовская

Автор работы  
студент группы П-456

\_\_\_\_\_ Диана Дмитриевна  
Точилкина

\_\_\_\_\_ 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

Точилкина Д.Д. Модернизация мехатронной системы толкателя методической печи – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ-456, 2020, 70 с, 28 ил., библиогр. список – 18 наим.

В данной выпускной квалификационной работе после анализа технологического процесса работы толкателя методической печи предложен проект по его модернизации. Проект включает реализацию контура регулирования по положению в САУ с помощью установки оптических датчиков.

Данное решение позволяет сократить время отправки заготовок в печь, тем самым увеличив эффективность установки.

В работе было выбрано основное оборудование, была разработана архитектура системы автоматизации, разработана структурная схема САР, описаны контуры регулирования координат, разработана функциональная схема САР, рассчитаны передаточные функции регуляторов и остальных звеньев. Создана математическая модель САР привода в пакете моделирования Simulink программы MATLAB.

Рассчитаны смета капитальных затрат и сумма расходов на содержание и эксплуатацию оборудования. Произведен расчет увеличения прибыли вследствие реализации проекта, рассчитан срок окупаемости проекта.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	9
1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса, принцип работы механизма.....	9
1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма .....	10
1.3 Требования к электроприводу и системе автоматизации .....	13
1.4 Выбор системы привода .....	14
1.5 Расчёт нагрузочной диаграммы и тахограммы .....	17
1.6 Выбор основного силового оборудования.....	19
1.7 Защита привода.....	29
2 РАЗРАБОТКА САУ .....	33
2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации .....	33
2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат .....	36
2.2.1 Программируемый логический контроллер .....	37
2.2.2 Блок питания.....	38
2.2.3 Выбор датчиков.....	40
2.2.4 Абсолютный энкодер .....	43
2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода .....	45
2.4 Разработка контуров регулирования технологических координат .....	46
2.5 Разработка структурной схемы САР и моделирование типовых режимов работы.....	47
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ.....	57
3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции .....	57
3.2 Расчёт производственной программы цеха .....	57
3.3 Расчет сметы капитальных затрат .....	59
3.3.1 Расчёт стоимости приобретённого оборудования.....	60
3.3.2 Расчет затрат на монтаж оборудования .....	61

3.3.3 Расчет величин транспортных расходов.....	61
3.4 Расчёт общего фонда оплаты .....	61
3.5 Расчет РСЭО.....	63
3.6 Расчёт прибыли.....	65
3.7 Расчет срока окупаемости.....	65
3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчётов .....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	69

## ВВЕДЕНИЕ

Челябинский металлургический комбинат (ЧМК) – российское металлургическое предприятие, одно из крупнейших предприятий России полного металлургического цикла, специализирующееся на производстве сталей, изготовлении широкого сортамента металлопроката из различных марок стали для большого количества секторов экономики.

В наше время почти каждое производство в мире частично или полностью автоматизировано. Человек всё меньше взаимодействует с техникой и участвует в технологическом процессе только на этапе управления и контроля самого процесса.

Автоматизация производства требуется большинству предприятий. Прогресс не стоит на месте. Если предприятие будет следовать за прогрессом, то, скорее всего, это привлечёт большое количество тех, кто захочет с ними сотрудничать и помогать внедрять новшества в производство.

С автоматизацией производства уменьшается количество людей, непосредственно участвующих в технологическом процессе. Благодаря этому фактору уменьшается человеческий фактор. То есть в результате мы получаем увеличение качества продукции. Системы смогут работать с гораздо большей точностью, чем раньше. Например, автоматизированные системы центровки работают с очень маленькой погрешностью, либо без погрешности вообще, чем если бы центровкой занимался человек.

Автоматизированные системы позволяют значительно повысить эффективность производственного процесса, за счёт чего увеличивается объём выпускаемой продукции, а также могут существенно снизиться расходы на сырьё.

Также автоматизация производства увеличивает безопасность самого производства. Уменьшается риск производственных травм у рабочих, влияние вредных условий работы на рабочего, что положительно скажется на бюджете производства.

В данной выпускной квалификационной работе объектом исследования выбран толкатель методической печи, который непосредственно задействован в технологическом процессе изготовления листового и сортового металлопроката.

Работоспособность толкателя значительно влияет на итоговую производительность производства. Цель данной работы – модернизация мехатронной системы толкателя заготовок методической печи для увеличения эффективности её работы.

Для достижения поставленной цели требуется определить и выполнить множество задач.

Для начала нужно провести анализ технологического процесса всей системы в целом и определить принцип работы самого толкателя печи. Далее требуется определить характеристики механизма и спроектировать кинематическую схему толкателя для последующего выявления проблемы и предложения её решения. На основе выбранного решения проблемы и из анализа технологического процесса и режимов работы механизма составлены требования к приводу и к системе автоматизации. В ходе проектирования рассчитаны необходимые усилия, приложенные к рабочему органу механизма. Зная усилия, необходимо было построить нагрузочные диаграммы и тахограмму, а на их основе выбрать подходящий двигатель и основное силовое оборудование – преобразователь частоты и систему защиты привода. Также нужно было произвести проверку двигателя на нагрев и перегрузочную способность.

Вторым большим этапом работы является разработка автоматизированной системы управления толкателя методической печи. Необходимо было построить архитектуру системы автоматизации. На её основе выбрать дополнительное оборудование. Это датчики технологических координат, контроллеры и блоки питания. Используя уже выделенные требования к системе автоматизации была построена функциональная схема регулирования электроприводом толкателя. После разработки функциональной схемы САР, необходимо детализировать систему: разработать контуры регулирования технологических координат.

Следующим действием является разработка структурной схемы системы автоматического управления, которая включает в себя расчёт передаточных функций звеньев схемы. Заключительным этапом разработки системы автоматического регулирования является моделирование типовых режимов работы привода толкателя.

В конце работы требуется экономическая оценка всего проекта в целом. Потому что каждое новшество должно быть экономически оправдано, иначе в нём нет никакого смысла.

Сначала было рассчитано годовое время работы механизма и производительность до и после модернизации. Далее производился расчёт капитальных затрат, то есть суммы затрат на новое оборудование, которое нужно приобрести или заменить, затрат на монтаж оборудования, расходов на транспорт, запасные части и остальную комплектацию оборудования. Необходимо было определить РСЭО – расходы на содержание и эксплуатацию оборудования. В них входят затраты на электроэнергию, амортизация оборудования и расходы на ремонт. Следующим этапом был расчёт оплаты труда рабочим, задействованным в технологическом процессе до и после модернизации.

Заключительный этап в экономической оценке и он же самый важный – расчёт изменения прибыли после модернизации и расчёт срока окупаемости проекта. На основе этих показателей и делается вывод об эффективности предложенного решения.

# 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса, принцип работы механизма

Челябинский металлургический комбинат был основан в 1943 году и предназначался для снабжения обороны страны во время Великой Отечественной Войны. После войны комбинат принимал участие в космических программах, снабжал металлом военных и хозяйственно-экономический сектор. В 2001 году ЧМК вошёл в состав компании «Мечел».

Сейчас ПАО «Челябинский металлургический комбинат» – входит в ряд крупнейших в России предприятий полного металлургического цикла по выпуску качественных и высококачественных сталей. Также ЧМК производит огромное количество нержавеющей стали. Комбинат может присваивать своей продукции индекс – Челябинская Сталь (ЧС). Такое право дано не многим предприятиям России.

ЧМК выпускает широкий сортамент продукции металлургического производства: чушковый чугун, стальные полуфабрикаты для дальнейшего передела, сортовой и листовой металлопрокат из углеродистых, конструкционных, инструментальных и коррозионно-стойких марок стали, фасонный прокат и рельсовую продукцию.

Основная продукция комбината – катанка, арматурный прокат периодического профиля, бунтовой прокат из конструкционной стали, сортовой проката для трубопрокатных и машиностроительных заводов, а также сортовая квадратная заготовка. [1]

Одним из промежуточных действий в обработке металла отправка заготовок в печь для их последующего нагрева. Отправляет заготовки в печь – толкатель методической печи.



В выпускной квалификационной работе будет рассмотрен привод толкателя методической печи.

Визуализация всей системы представлена на рисунке 1.1.

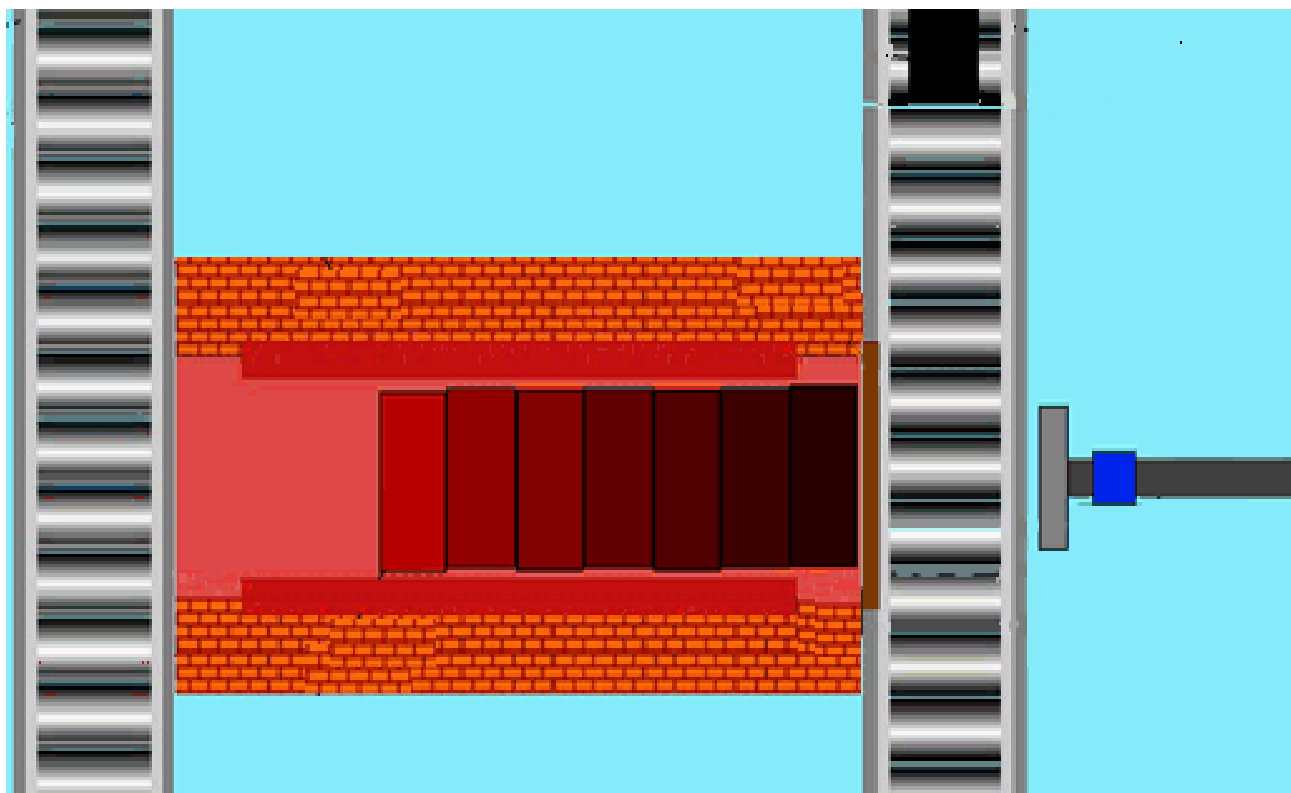


Рисунок 1.1. Визуализация технологического процесса

По технологическому процессу система состоит из двух рольгангов – подающего и принимающего, печи, заготовок и самого толкателя.

Толкатель подает заготовку, поступающую с рольганга в печь и продвигает дальше заготовки (слябы или блюмы), находящиеся в печи к другому краю, которые за время перемещения нагреваются до необходимой температуры и выходят для дальнейшей обработки.

## 1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

Рассмотрим подробнее привод толкателя печи. На рисунке 1.2 представлена его подробная кинематическая схема.

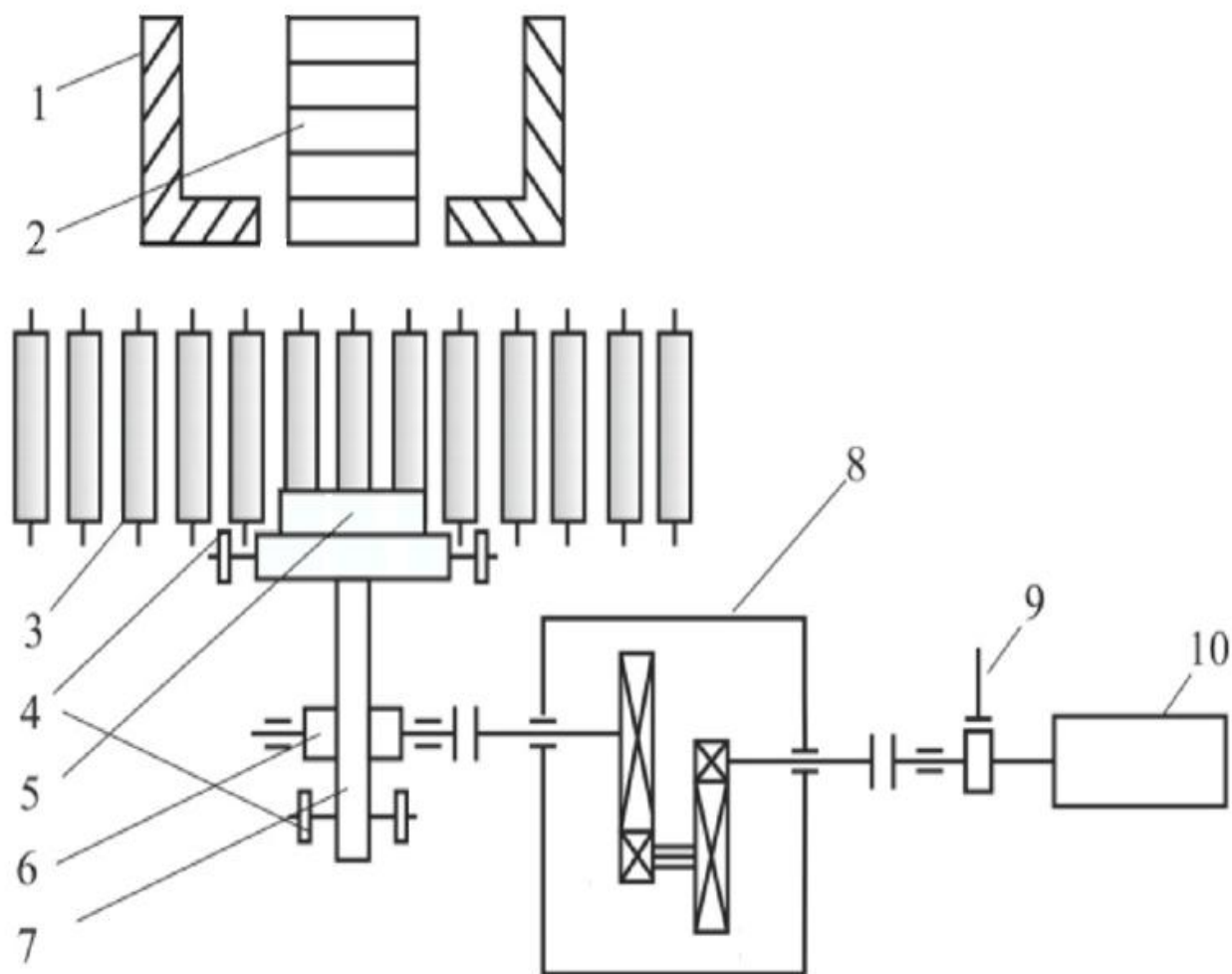


Рисунок 1.2. Кинематическая схема толкателя печи:

1 – печь; 2 – заготовки внутри печи; 3 – подающий рольганг; 4 – опорный ролик; 5 – поступившая заготовка; 6 – реечная шестерня; 7 – толкатель; 8 – редуктор; 9 – тормозной шкив; 10 – электродвигатель

Подающий рольганг доставляет заготовку к толкателю для последующей транспортировки её в печь. Толкатель приводится в движение электродвигателем через редуктор. Тормозной шкиф нужен для эффективной остановки и удержании в заторможенном состоянии валовых механизмов при выключенном двигателе. Благодаря ему при аварийной ситуации потребуется меньшее усилие для остановки.

Между толкателем и заготовкой присутствует небольшое расстояние. Включается двигатель, и толкатель начинает двигаться к заготовке до контакта с ней. После этого на установившейся рабочей скорости они перемещаются до следующего контакта с остальными заготовками в печи, следующим действием

является продвижение всех заготовок вместе на расстояние равное ширине одной заготовки. Если в печи нет места, то последняя заготовка выталкивается на принимающий рольганг. После всего толкатель реверсируется и на скорости в 1,5 раза больше, чем при прямом ходе, возвращается в исходное положение.

На рисунке 1.3 представлена циклограмма работа толкателя печи. Первый участок соответствует разгону толкателя до установившейся скорости. На втором участке толкатель вместе с заготовкой равномерно движется с рабочей скоростью. На третьем – толкатель тормозит с рабочей скорости до полной остановки. Участок 4 соответствует реверсу скорости и разгону толкателя. Участок 5 – движение толкателя назад с установившейся скоростью, равной значению в полтора раза большему, чем значение скорости при прямом ходе. И 6 участок соответствует торможению толкателя в реверсе и полной его остановке.

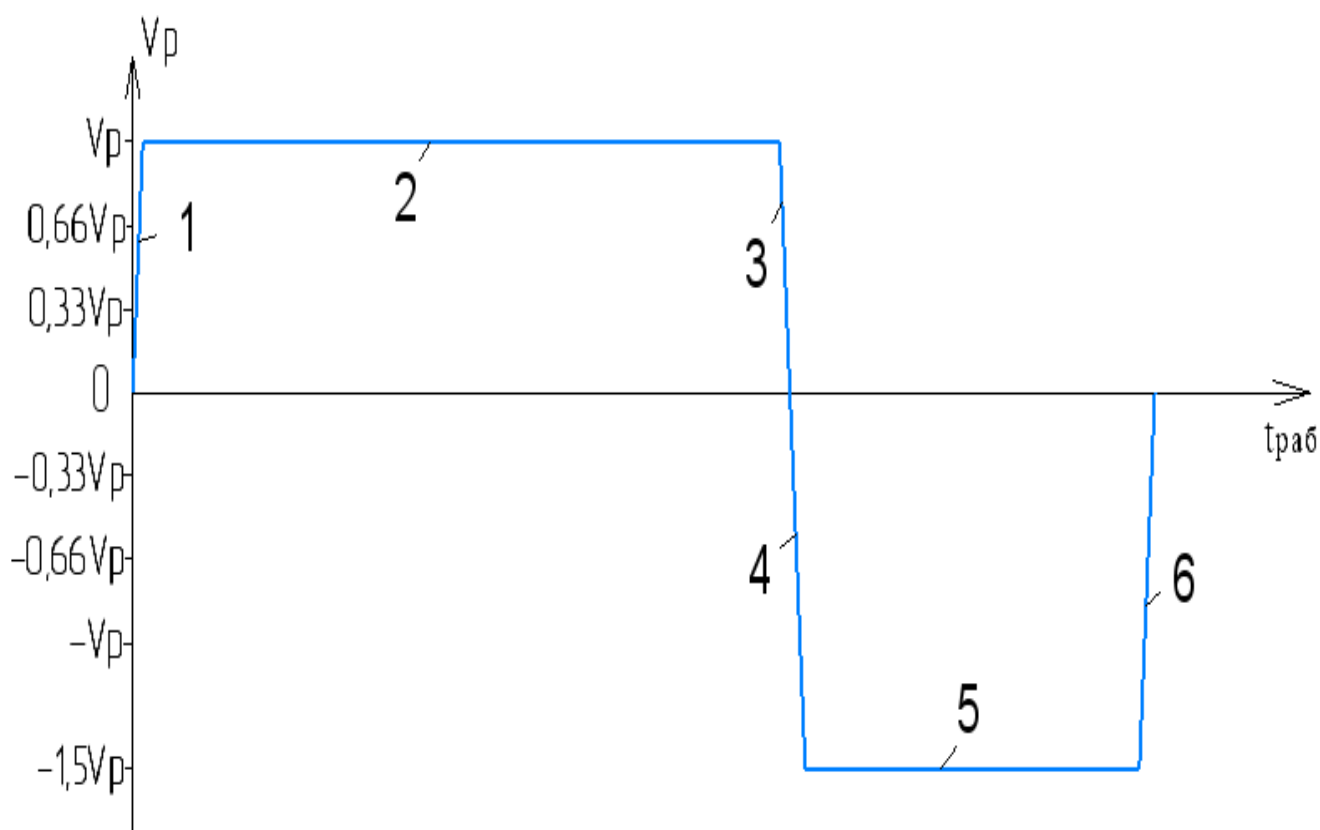


Рисунок 1.3. Циклограмма работы толкателя

В таблице 1.1 сводная таблица характеристик привода толкателя печи.

Таблица 1.1. Характеристики привода толкателя печи

Характеристика	Значение
Масса штанги с рейкой $m_{ш}$ , кг	6000
Диаметр реечной шестерни $D$ , м	0,5
Масса одной заготовки $m_з$ , кг	1500
Ширина одной заготовки $b$ , м	0,25
Перемещение $S$ , м	8
Рабочая скорость $v_p$ , м/с	0,25
Время работы $t_p$ , с	19
Число циклов $z$ , 1/ч	50
Допустимое ускорение $a_{доп}$ , м/с <sup>2</sup>	1
Диаметр шейки ролика $d_{ш}$ , м	0,125
Коэффициент трения скольжения $\mu$	0,015-0,02
Коэффициент трения качения $f$ , мм	2
Момент инерции вала со звёздочками $J_p$ , кг·м <sup>2</sup>	90
Момент инерции тормозного шкива $J_{ш}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,4
Скорость возврата $v_в$ , м/с	0,375
Количество заготовок в печи $N$ , шт.	6
Передаточное число редуктора $i$	50

### 1.3 Требования к электроприводу и системе автоматизации

Основные требования:

Возможность движения в обратном направлении;

Возможность работы в повторно-кратковременном режиме;

Скорость на реверсе в 1,5 раза больше, чем в прямом направлении;

Статическая ошибка по положению не более 1 %.

## 1.4 Выбор системы привода

В данном пункте требуется определить нужный тип двигателя.

Рассмотрим различные виды приводов, и проанализировав их, выберем подходящий нам привод.

Способы управления толкателя печи достаточно обширны и в них входят гидроприводы, пневмоприводы и электроприводы.

Гидравлический привод имеет достаточно большую мощность, быстродействие, обладает малой вибрацией, в следствие чего она почти не оказывает влияние на здоровье рабочего персонала.

Но у гидропривода есть и значительные недостатки. Он обладает малым коэффициентом полезного действия по сравнению с электроприводом, в следствие чего потери энергии становятся очень большими.

Гидравлические привода сильно зависят от условий окружающей среды, что может негативно сказаться на использовании его в приводе толкателя печи, где большие диапазоны температур. Также жидкость в приводе потребует частой замены из-за обильного загрязнения. Это плохо отразится на эксплуатации механизма, так как потребуются частые простои участка.

Пневматический привод по сравнению с гидравлическим потребует гораздо меньше внимания по части обслуживания, также он прост в конструкции и меньше зависит от перепада температур и других изменяющихся условий окружающей среды, таких как влажность или загрязнённость помещения.

Но пневмопривод также имеет свои недостатки. Он не всегда может двигаться с равномерной скоростью, что скажется на точности перемещения заготовки в печь. В механизме толкателя печи это допускать нельзя. К тому же коэффициент полезного действия пневматического привода ещё меньше, чем у гидравлического.

Электрический привод не имеет недостатков гидро- и пневмоприводов, хоть его мощность и быстродействие меньше последних. Электропривод прост в

обслуживании и эксплуатации, почти не зависит от внешних условий среды и может удерживать направление движения и равномерную скорость без рывков.[3]

Существует два вида электроприводов – постоянного и переменного токов.

У двигателей постоянного тока есть как достоинства, так и недостатки. К достоинствам относятся: широкий диапазон регулирования частоты, простота устройства, возможность работы в двигательном и генераторном режиме. Но такие двигатели дороже, менее надёжны и имеют небольшой срок службы.

Двигатели переменного тока имеют большой спрос на рынке, просты в конструкции и долговечны. Такие привода сложнее регулировать по скорости, но они гораздо надёжнее, чем двигатели постоянного тока. В связи с этим снижается потребность в частых ремонтах.

Проанализировав выше изложенную информацию, а также зная требования к приводу, выберем асинхронный двигатель переменного тока.

Данный двигатель имеет большой спрос на рынке, имеет простую конструкцию и большое время эксплуатации. Также он достаточно дешёвый и надёжный в использовании, что важно в производстве металлопроката.

Преимуществом асинхронного двигателя также является удержание равномерной скорости при неравномерной нагрузке и наличие возможности перегрузки на малое время, что очень важно при данном технологическом процессе.

Асинхронные двигатели в основном различаются устройством ротора, который бывает двух типов: фазный или короткозамкнутый.

В данном проекте выбор будет в пользу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором из-за его большого распространения и отсутствия щёточного аппарата.

Рассмотрим конструкцию данного двигателя.

Трёхфазный асинхронный двигатель состоит из 2 основных частей – ротора и статора. Статор - неподвижная часть, ротор - вращающаяся часть. Ротор размещается внутри статора. Между ротором и статором имеется небольшое

расстояние, которое называется воздушным зазором. Конструкция асинхронного электродвигателя представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4. Асинхронный электродвигатель

Три обмотки размещены в пазах на внутренней стороне сердечника статора асинхронного двигателя. Обмотка же ротора асинхронного двигателя не имеет электрического соединения с сетью и с обмоткой статора. Начало и концы фаз обмоток статора присоединяют к зажимам в коробке выводов по схеме звезда или треугольник. [2]

## 1.5 Расчёт нагрузочной диаграммы и тахограммы

На основе данных технологического цикла, характеристик механизма, требований к приводу произведем расчет и построение зависимости скорости вращения и суммарного момента от времени.

Цель расчёта – на его основе рассчитать и выбрать привод механизма, обеспечивающий все нужные требования.

По технологическому процессу старт начинается с нулевого значения скорости и с допустимым ускорением производится разгон и торможение.

Расчёт времени цикла:

Время пуска механизма до установившейся скорости и время торможения рассчитывается:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = \frac{v_y}{a_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

где  $v_y$  – установившаяся скорость, м/с;  $a_{\text{доп}}$  – допустимое ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Расстояние, которое пройдет механизм за время пуска/торможения:

$$L_{\text{п}} = L_{\text{т}} = \frac{v_y^2}{2 \cdot a_{\text{доп}}}. \quad (2)$$

Время установившегося режима при движении с установившейся скоростью:

$$t_y = \frac{L - (L_{\text{п}} - L_{\text{т}})}{v_y}, \quad (3)$$

где  $L$  – перемещение толкателя, м.

Итак, при движении вперед с заготовкой:

$$t_{\text{п}}^{\text{п}} = t_{\text{т}}^{\text{п}} = \frac{0,25}{1} = 0,25\text{с}; \quad (4)$$

$$L_{\text{п}}^{\text{п}} = L_{\text{т}}^{\text{п}} = \frac{0,25^2}{2 \cdot 1} = 0,031\text{м}; \quad (5)$$

$$t_y^{\text{п}} = \frac{8 - (0,031 + 0,031)}{0,25} = 31,75\text{с}. \quad (6)$$



При возврате без заготовки:

$$t_{\pi}^B = t_{\tau}^B = \frac{0,375}{1} = 0,375\text{с}; \quad (7)$$

$$L_{\pi}^B = L_{\tau}^B = \frac{0,375^2}{2 \cdot 1} = 0,07\text{м}; \quad (8)$$

$$t_y^B = \frac{8 - (0,07 + 0,07)}{0,375} = 20,96\text{с}. \quad (9)$$

Время цикла определяется как сумма времён разгона, торможения и равномерного движения:

$$\begin{aligned} t_p &= t_{\pi}^P + t_y^P + t_{\tau}^P + t_{\pi}^B + t_y^B + t_{\tau}^B = \\ &= 0,25 + 31,75 + 0,25 + 0,375 + 20,96 + 0,375 = 53,96\text{с} \end{aligned} \quad (10)$$

Произведём расчёт статических моментов.

Силы трения качения создают момент сил трения качения:

$$M_{\text{тк}}^B = m \cdot f \cdot g = 6000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 117,72\text{Н} \cdot \text{м}, \quad (11)$$

где  $m$  – масса механизма и его деталей, опирающихся на узел качения, масса поднимаемого или опускаемого груза, кг;  $f$  – коэффициент трения качения.

Силы трения скольжения создают момент сил трения скольжения:

$$M_{\text{тс}} = \frac{m \cdot \mu_c \cdot g \cdot D}{2}, \quad (12)$$

где  $\mu_c$  – коэффициент трения скольжения заготовок;  $D$  – диаметр шестерни реечного механизма.

При движении с одной заготовкой момент трения скольжения равен:

$$M_{\text{тс}} = \frac{(1500 + 6000) \cdot 0,15 \cdot 9,8 \cdot 0,5}{2} = 2759,06\text{Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

При движении с несколькими заготовками в печи момент трения скольжения равен:

$$M_{\text{тс}} = \frac{(6 \cdot 1500 + 6000) \cdot 0,15 \cdot 9,8 \cdot 0,5}{2} = 5518,12\text{Н} \cdot \text{м}. \quad (14)$$

Момент сил трения в подшипниках определяется как:

$$M_{\text{тп}}^B = \frac{m_1 \cdot d_{\text{ш}} \cdot \mu \cdot g}{2} = \frac{6000 \cdot 0,125 \cdot 0,02 \cdot 9,8}{2} = 73,57\text{Н} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

где  $m_1$  – масса деталей и узлов, опирающихся на ролики, кг;  $d_{ш}$  – диаметр шейки ролика, м;  $\mu$  – коэффициент трения скольжения в подшипниках;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, получаем, что суммарный статический момент при движении толкателя к заготовке или при реверсе толкателя равен:

$$M_{\text{рост1}} = M_{\text{тк}} + M_{\text{тп}} = 117,72 + 73,57 = 191,29 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (16)$$

Суммарный статический момент при движении с одной заготовкой:

$$M_{\text{рост2}} = M_{\text{тк}} + M_{\text{тп}} + M_{\text{тс}}^{\text{P}} = 191,29 + 2759,06 = 2950,35 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (17)$$

Суммарный статический момент при движении с заготовками в печи:

$$M_{\text{рост3}} = M_{\text{тк}} + M_{\text{тп}} + M_{\text{тс}}^{\text{B}} = 191,29 + 5518,12 = 5709,41 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (18)$$

Статические моменты, приведённые к валу двигателя, рассчитаем по формуле:

$$M_{\text{pc}} = \frac{M_{\text{рост}}}{i}, \quad (19)$$

где  $M_{\text{рост}}$  – статический момент толкателя;  $i$  – передаточное число редуктора.

При движении толкателя к заготовке или при реверсировании толкателя приведённый статический момент равен:

$$M_{\text{pc}}^{\text{P}} = \frac{191,29}{50} = 3,83 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (20)$$

При движении с одной заготовкой приведённый статический момент равен:

$$M_{\text{pc}}^{\text{B}} = \frac{2950,35}{50} = 59 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (21)$$

При движении со всеми заготовками в печи приведённый статический момент равен:

$$M_{\text{pc}}^{\text{P}} = \frac{5709,41}{50} = 114,2 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (22)$$

## 1.6 Выбор основного силового оборудования

Предварительный выбор двигателя определяется исходя из условия:

$$K \cdot M_{\text{срkv}} \leq M_{\text{н}}, \quad (23)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку привода,  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент выбираемого двигателя,  $M_{\text{срkv}}$  – эквивалентный среднеквадратический статический момент.

Рассчитаем среднеквадратическое значение момента:

$$M_{\text{срkv}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m M_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k}}, \quad (24)$$

где  $M_k$  – момент двигателя на  $k$ -м участке, Н·м;  $t_k$  – длительность  $k$ -го участка, с.

$$M_{\text{срkv}} = \sqrt{\frac{3,83^2 \cdot 0,25 + 59^2 \cdot 31,75 + 114,2^2 \cdot 0,25 + 3,83^2 \cdot 21,71}{53,96}} = 45,98 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (25)$$

На основе рассчитанного среднеквадратического момента выберем асинхронный двигатель АИРМ132М8, подходящий по номинальному моменту. [5]

Проверим выбранный двигатель на соответствие условию:

$$\begin{aligned} 1,5 \cdot 45,98 &\leq 73,4, \\ 68,97 &\leq 73,4 \end{aligned} \quad (26)$$

По выражению (26) видно, что условие выполняется. Значит, выбранный двигатель подходит.

Основные технические характеристики выбранного двигателя приведены в таблице 2. [5]

Таблица 1.2. Характеристики двигателя АИРМ132М8

Характеристика	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{н}}$ , кВт	5,5
Номинальная частота вращения $n_{\text{н}}$ , об/мин	715
Номинальный ток $I_{\text{н}}$ , А	13,8
КПД, %	83
Номинальный момент $M_{\text{н}}$ , Нм	73,4

Продолжение таблицы 1.2.

Характеристика	Значение
Максимальный момент $M_{\max}$ , Нм	146,8
Масса двигателя $m_{\text{дв}}$ , кг	82
Динамический момент инерции $J$ , кгм <sup>2</sup>	0,074
Пусковой ток $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	5,3
Степень защиты	IP54

Произведём расчёт динамических моментов механизма.

Для этого нужно найти моменты инерции механизма, приведённые к валу двигателя.

Момент инерции рассчитывается как:

$$J_{\text{po}} = J + \frac{m \cdot D^2}{4}, \quad (27)$$

где  $J$  – моменты инерции вращающихся элементов механизма;  $m$  – масса поступательно движущихся частей;  $D$  – диаметр реечной шестерни.

При движении с одной заготовкой момент инерции равен:

$$J_{\text{po}}^{\text{п}} = (J_{\text{п}} + J_{\text{ш}}) + \frac{(m + m_3) \cdot D^2}{4} = (90 + 0,4) + \frac{(6000 + 1500) \cdot 0,5^2}{4} = 559,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (28)$$

При движении без заготовки момент инерции равен:

$$J_{\text{po}}^{\text{б}} = (J_{\text{п}} + J_{\text{ш}}) + \frac{m \cdot D^2}{4} = 90,4 + \frac{6000 \cdot 0,5^2}{4} = 380,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (29)$$

При движении с заготовками внутри печи момент инерции:

$$J_{\text{po}}^{\text{б}} = (J_{\text{п}} + J_{\text{ш}}) + \frac{(m + m_3) \cdot D^2}{4} = 90,4 + \frac{(6000 + 6 \cdot 1500) \cdot 0,5^2}{4} = 943,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (30)$$

При данной величине допустимого ускорения  $a_{\text{доп}}$  необходимо, для каждого режима определить динамические моменты, которые рассчитываются по формуле:

$$M_{\text{родин}} = J_{\text{po}} \cdot \frac{2 \cdot a_{\text{доп}}}{D}. \quad (31)$$

При движении с одной заготовкой динамический момент рабочего органа равен:

$$M_{\text{родин}}^p = J_{\text{ро}}^p \cdot \frac{2 \cdot a_{\text{доп}}}{D} = 559,15 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,5} = 2236,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (32)$$

При разгоне и торможении без груза динамический момент рабочего органа равен:

$$M_{\text{родин}}^b = J_{\text{ро}}^b \cdot \frac{2 \cdot a_{\text{доп}}}{D} = 380,65 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,5} = 1522,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (33)$$

При торможении с заготовками внутри печи динамический момент рабочего органа равен:

$$M_{\text{родин}}^b = J_{\text{ро}}^b \cdot \frac{2 \cdot a_{\text{доп}}}{D} = 943,15 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,5} = 3772,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (34)$$

Общий момент рабочего органа определяется как сумма статического и динамического моментов рабочего органа:

$$M_{\text{ро}} = M_{\text{рост}} + M_{\text{родин}} \quad (35)$$

Суммарный момент на первом участке – разгон толкателя при прямом ходе:

$$M_{\text{ро}}^1 = M_{\text{рост1}} + M_{\text{родин}}^b = 191,29 + 1522,6 = 1713,89 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (36)$$

Суммарный момент на втором участке, где толкатель подходит к заготовке:

$$M_{\text{ро}}^2 = M_{\text{рост1}} = 191,29 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (37)$$

Суммарный момент на третьем участке – при равномерном движении толкателя с одной заготовкой до контакта в печи с другими заготовками:

$$M_{\text{ро}}^3 = M_{\text{рост2}} = 2950,95 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (38)$$

Суммарный момент толкателя на четвёртом участке, где толкатель движется со всеми заготовками в печи:

$$M_{\text{ро}}^4 = M_{\text{рост3}} = 5709,41 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (39)$$

Суммарный момент на пятом участке – при торможении толкателя со всеми заготовками в печи:

$$M_{\text{ро}}^5 = M_{\text{рост3}} - M_{\text{родин}}^p = 5709,41 - 3772,6 = 1936,81 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (40)$$

Суммарный момент на шестом участке – разгон толкателя при реверсе:

$$M_{po}^6 = -M_{рост1} - M_{родин}^B = -191,29 - 1522,6 = -1713,89 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (41)$$

Суммарный момент на седьмом участке – равномерное движение толкателя при реверсе:

$$M_{po}^7 = -M_{рост1} = -191,29 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (42)$$

Суммарный момент на восьмом участке – торможение толкателя при реверсе и полная его остановка:

$$M_{po}^8 = M_{рост1} - M_{родин}^B = 191,29 - 1522,6 = -1331,31 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (43)$$

Нагрузочная диаграмма механизма и тахограмма двигателя представлены на рисунке 1.5.

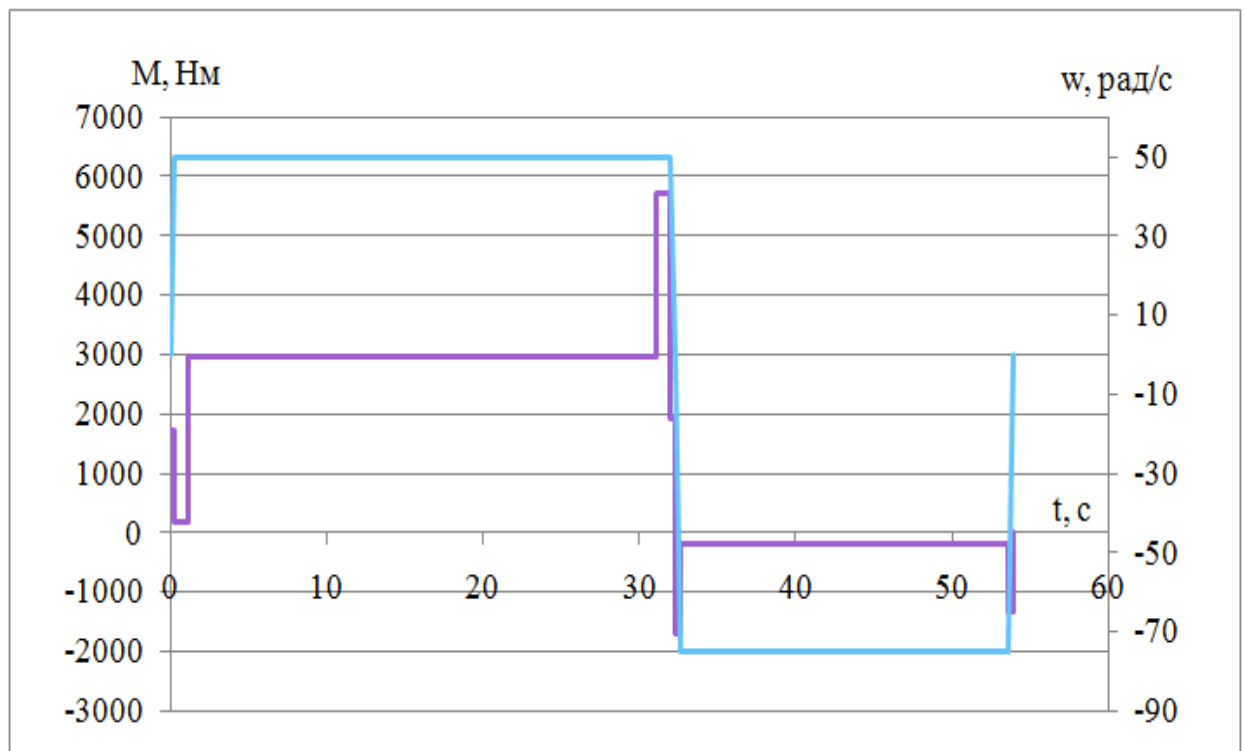


Рисунок 1.5. Нагрузочная диаграмма (фиолетовая) и тахограмма (голубая) механизма

Далее необходимо выполнить проверочный расчёт и убедиться, что двигатель подходит по нагреву и перегрузочной способности. Условие для выполнения по нагреву следующее:

$$M_{эКВ} < 0,8 \cdot M_H, \quad (44)$$

где  $M_{\text{экв}}$  – эквивалентный среднеквадратичный момент, Нм;  $M_n$  – номинальный момент двигателя, Нм.

Делаем проверку:

$$45,98 < 58,7 \quad (45)$$

Из выражения (45) видно, что двигатель прошел проверку на нагрев.

Далее делаем проверку двигателя по перегрузочной способности. Условие для проверки:

$$M_{\text{макс}} < M_{\text{макс.дв}} \quad (46)$$

где  $M_{\text{макс}}$  – максимальный момент расчётный, Нм;  $M_{\text{макс.дв}}$  – максимальный момент двигателя, Нм.

Делаем проверку:

$$114,2 < 146,8 \quad (47)$$

По выражению (47) видно, что условие выполняется, а это означает, что двигатель прошел проверку по перегрузочной способности.

Следующим этапом является выбор преобразователя частоты.

Преобразователь частоты состоит из инвертора и моста постоянного тока. Инвертор преобразует постоянный ток в переменный, но необходимой частоты, а мост выпрямляет поступающий из сети промышленный ток и после передает его на инвертор.

Такая схема имеет как достоинства, так и недостатки.

Преимущества данной схемы в том, что за счёт моста и инвертора обеспечивается плавное регулирование скорости вращения вала электродвигателя, что обеспечивает качество эксплуатации, повышает надежность и безотказность оборудования системы, снижает эксплуатационный расходы.

Также есть возможность реализации частотного пуска, за счёт чего реализуется не такой резкий разгон механизма, вследствие чего значительно уменьшаются пусковые токи. Также уменьшается вибрация, что повышает срок службы и уменьшает простои на ремонте.

Возможно удержание заданной скорости, либо каких-то других изменяющихся параметров механизмов при разных значениях нагрузки, что так же важно в механизме толкателя.

Из-за отсутствия двигающихся частей существует возможность реализации большой точности регулирования параметрами. Благодаря этому же критерию увеличивается срок работы. Коэффициент полезного действия такой системы достаточно высок в отличие от других схем управления асинхронными двигателями.

К недостаткам преобразователей частоты относятся такие их факторы, как чувствительность к помехам и дороговизна. Но указанные преимущества значительно перекрывают данные минусы. [4]

При выборе преобразователя частоты должны выполняться некоторые условия: его номинальное напряжение должно быть больше или равно номинальному напряжению двигателя, номинальный ток также должен быть больше или равен номинальному току двигателя, и мощность преобразователя должна быть больше или равна мощности электродвигателя.

Указанным требованиям удовлетворяет преобразователь ACS 800-01-0011-3. Сводная таблица его характеристик представлена в таблице 1.3. [6]

Таблица 1.3. Характеристики преобразователя частоты

Характеристика	Значение
Номинальный ток, А	19
Номинальная мощность, кВт	7,5
Входная частота, Гц	50
Выходная частота, Гц	До 300
Количество фаз	3
Степень защиты	IP21
Интерфейс связи	FieldBus
Максимальный ток нагрузки, А	24
Диапазон рабочих температур	От -15 до +50



Продолжение таблицы 1.3.

Характеристика	Значение
Габариты, мм	471x265x173

Внешний вид выбранного преобразователя частоты представлен на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6. Преобразователь частоты

Привода тех промышленных механизмов, которые работают в повторно-кратковременных режимах с частыми включениями и выключениями привода, а также реверсами, нужно оснастить тормозными резисторами. Тормозные резисторы помогут обеспечить быструю остановку электродвигателя.

При торможении асинхронный двигатель работает в режиме генератора, его отдаваемая электрическая энергия способна вызвать перенапряжение в сети постоянного тока, поэтому для гашения этого эффекта применяют тормозные резисторы.

Использование тормозных резисторов обладает рядом преимуществ:

Во-первых, такие резисторы делают процесс торможения более плавным, если рассматривать с точки зрения различных перегрузок. То есть отсутствуют резкие скачки тока и напряжения в приводе.

Второе это то, что процесс торможения становится легче контролировать. Это особенно важно, если во время процесса есть очень большие моменты. Также становится гораздо проще менять параметры торможения.

И можно добавить то, что такое устройство конструктивно простое и недорогое. Тормозные резисторы подходят для очень широкого диапазона нагрузок привода, и оно не зависит от схемы преобразователя частоты

Выберем тормозной резистор SACE15RE22 с сопротивлением 22 Ом.

Внешний вид тормозного резистора представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7. Тормозной резистор

Схема преобразователя частоты, включающая тормозной резистор показана на рисунке 1.8.

Преобразователь частоты имеет выпрямительную часть – диоды VD1-VD3, VD8-VD10 и инверторную часть – диоды VD5-VD7, VD12-VD14 и транзисторы IGBT T2 - T7. Тормозной резистор обозначен маркировкой BR.

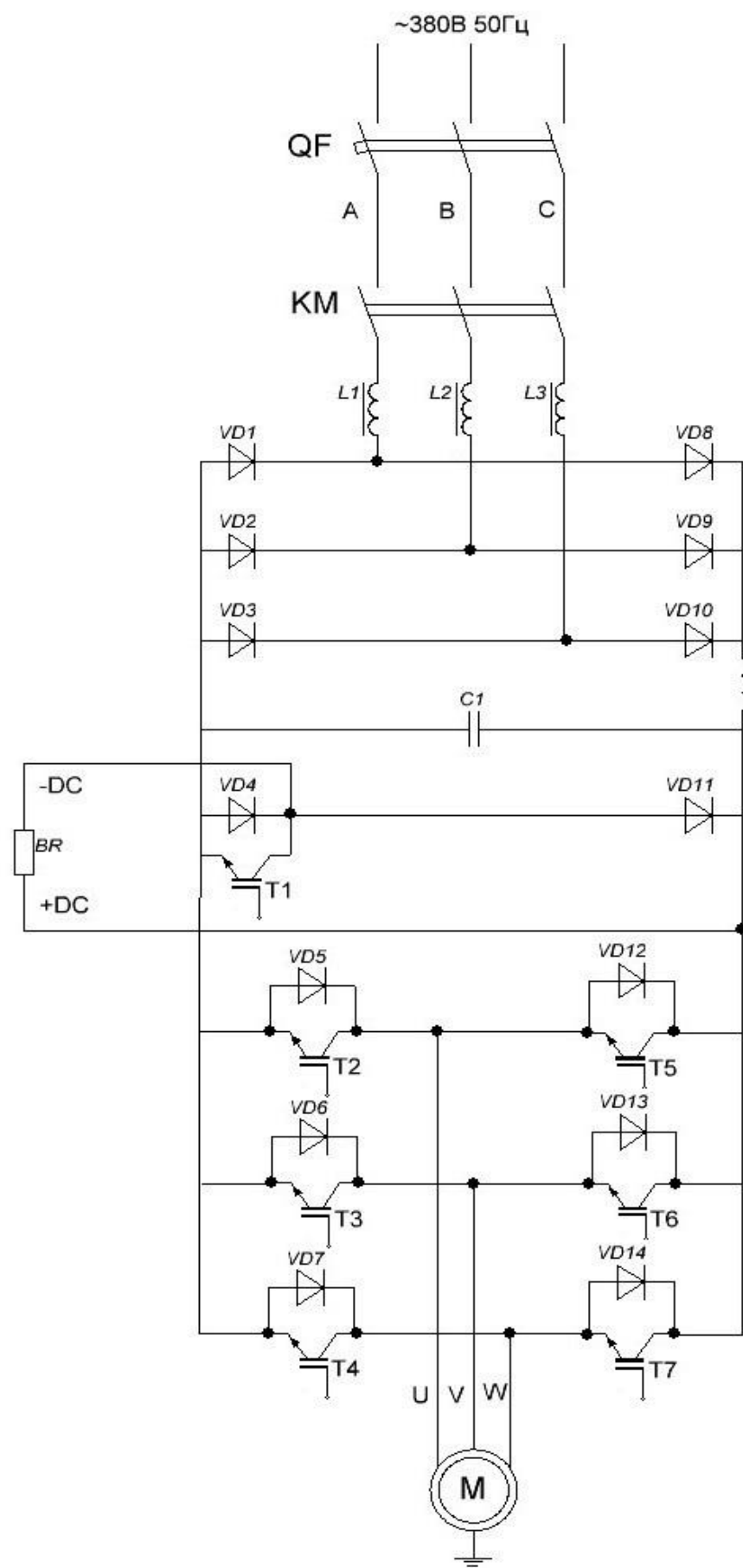


Рисунок 1.8. Схема преобразователя частоты

## 1.7 Защита привода

Защитой называют аппарат или узел схемы, который отключает электропривод после возникновения в нём каких-либо аварийных режимов. Для предотвращения появления таких режимов работы электродвигателя и другого электрооборудования нужно выбрать определённые средства защиты. [7]

Токовая защита служит для отключения от сети главной цепи при появлении в ней токов короткого замыкания или ненормально больших токов, а также при длительных перегрузках. Основными причинами появления токов короткого замыкания и больших токов могут быть повреждения изоляции двигателя или подводных проводов, выход из строя устройств на станции управления или пусковых резисторов, а также механическая перегрузка двигателя.

Для защиты от коротких замыканий выберем плавкие предохранители. При пусковом токе равным 41,4 А выберем плавкую вставку с номиналом 50А марки КЭАЗ, модель ПН2-100-50А-У3. Ее внешний вид представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7. Плавкая вставка

Срок службы электрооборудования в основном зависит от перегрузок, которым оно подвергается во время работы. Поэтому для защиты электродвигателей от токовой перегрузки используют тепловые реле.

Выбор теплового реле осуществляют по номинальному току исходя из номинальной нагрузки электродвигателя.

Для защиты от перегрузки выберем тепловое реле РТЛ-1022-2 с диапазоном токовой уставки от 17 А до 25А. Внешний вид теплового реле представлен на рисунке 1.8. Схема подключения реле представлена на рисунке 1.9.



Рисунок 1.8. Тепловое реле

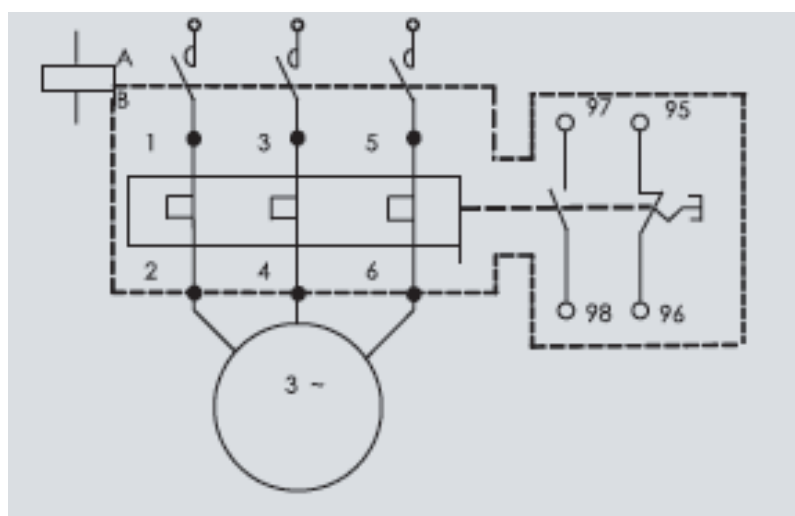


Рисунок 1.9. Схема подключения теплового реле

Внутренняя конструкция теплового реле представлена на рисунке 1.10.

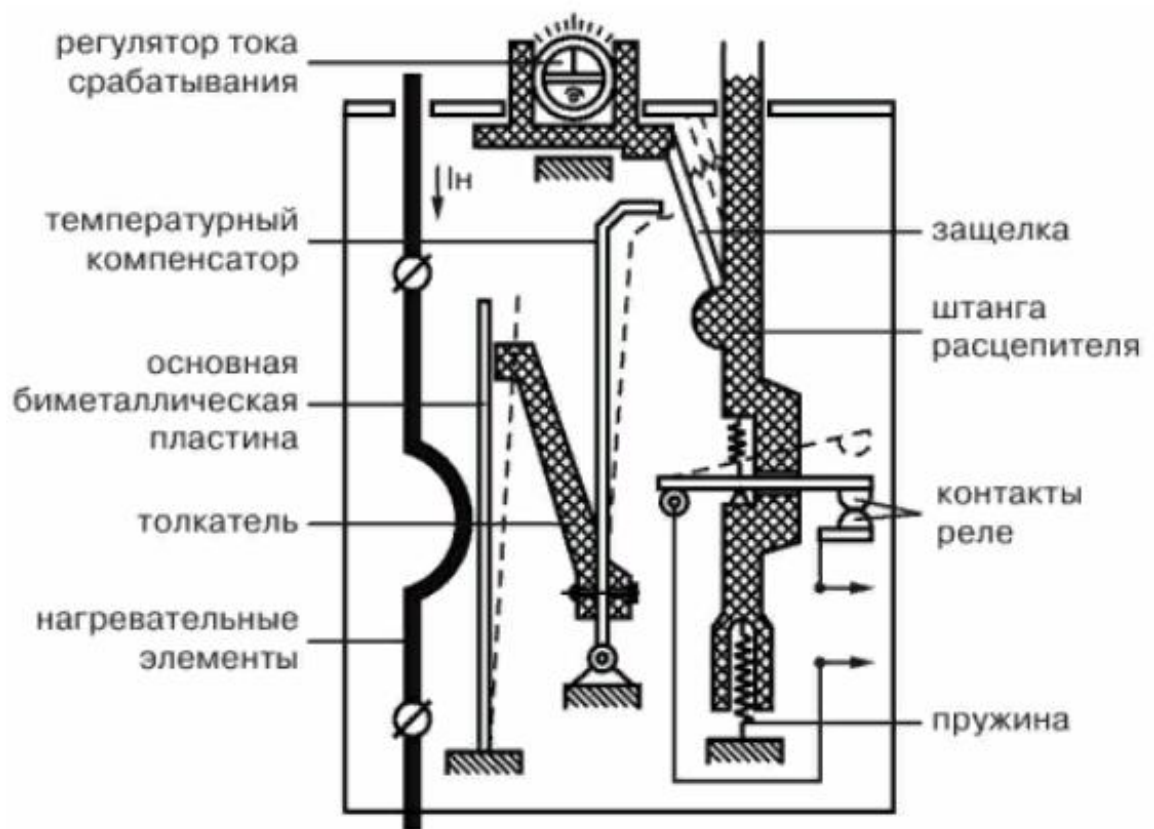


Рисунок 1.10. Внутренняя конструкция теплового реле

Нагрев биметаллической пластинки теплового реле зависит от температуры окружающей среды, поэтому с ростом температуры окружающей среды ток срабатывания реле уменьшается.

Перенапряжение – ненормальный режим работы в электрических сетях, который заключается в чрезмерном увеличении значения напряжения выше допустимых значений для участка электрической сети, который является опасным для элементов оборудования данного участка электрической сети.

Изоляция оборудования электроустановок рассчитана на нормальную работу при определенных значениях напряжения, в случае наличия перенапряжения, изоляция приходит в негодность, что приводит к повреждению оборудования и представляет опасность для обслуживающего персонала или людей, которые находятся в непосредственной близости к элементам электрических сетей.

Для защиты от перенапряжения используют реле тока. Выберем универсальный блок защиты УБЗ-301.

Он предназначен для постоянного контроля параметров сетевого напряжения и действующих значений фазных и линейных токов трехфазного электрооборудования. Блок защиты осуществляет защиту оборудования за счёт отключения его от сети, либо блокированием пуска оборудования. Его внешний вид представлен на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11. Универсальный блок защиты

Данный блок защиты является микропроцессорным устройством с высокой степенью надёжности и точности. Оперативного питания не требуется – контролируемое напряжение является одновременно напряжением питания. Одновременный отдельный независимый контроль по сетевому напряжению и фазным токам позволяет различать вид возникшей аварии. При авариях сетевого напряжения блок осуществляет автоматическое повторное включение нагрузки после восстановления параметров напряжения. Если авария возникла из-за повреждений внутри двигателя, то происходит блокировка повторного пуска.

## 2 РАЗРАБОТКА САУ

### 2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации

Автоматические системы управления технологическим процессом позволяют улучшить качество выпускаемой продукции, увеличить производительность труда, улучшить условия труда персонала, а также сократить расход сырья и электроэнергии.

Автоматизированная система направлена на выполнение управляющей и информационно-вычислительной функций. Первая из них выполняет регулировку конкретных процессов производства и технологических координат агрегатов. Под второй функцией понимают считывание, входной анализ и хранение информации, отображение на экранах и диагностирование показателей работы участков, установок или конкретного оборудования и взаимодействие между уровнями автоматизации и смежными устройствами с целью передачи данных.

Уровни автоматизированной системы управления представлены на рисунке 2.1.

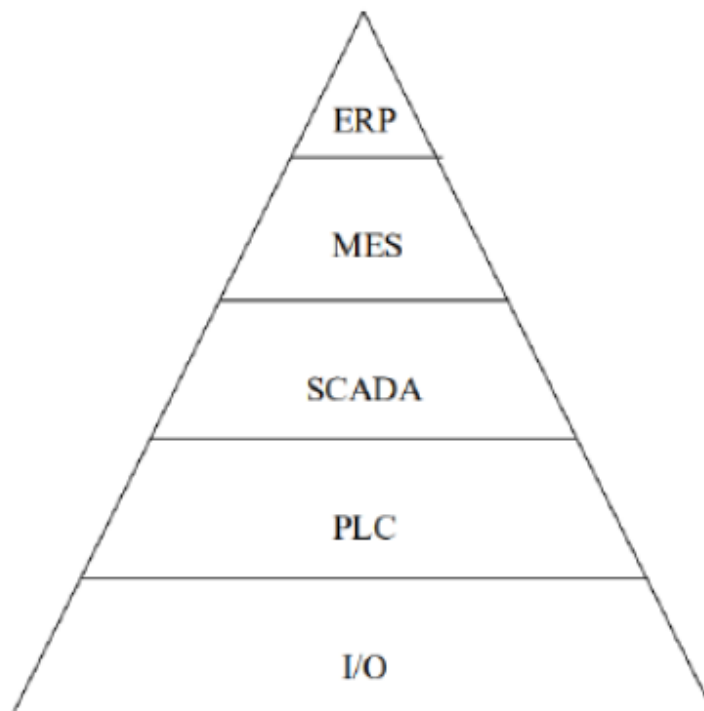


Рисунок 2.1. Уровни автоматизированной системы управления



Нижний уровень системы (Input/Output-уровень) составляют датчики, устройства измерения технологических параметров, приводы и исполнительные устройства, установленные на технологическом оборудовании и предназначенные для сбора первичной информации и реализации исполнительных воздействий.

На втором уровне (PLC-уровень) находятся контроллеры, логически программируемые с целью выполнения функции прямого автоматического управления работой оборудования. Исполнительные механизмы управляются определенными алгоритмами. Входными параметрами являются обработанные данные состояния технологических координат, считанные измерительными приборами. Чаще всего данный уровень охвачен промышленной сетью Ethernet через которую происходит обмен информацией.

Третий уровень характеризуется станцией, на которой происходит управление и отслеживание технологического процесса оператором. SCADA (англ. Supervisory Control and Data Acquisition – рус. сбор данных и диспетчерское управление) – программа, осуществляющая разработку или обеспечение работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте отслеживания и управления.

Файловые серверы данных предприятия и рабочие места операторов оборудования составляют SCADA систему. На серверах держится работа SCADA системы. Они постоянно поддерживают обмен данными с оборудованием (контроллерами, интеллектуальными датчиками и механизмами) и протокол работы с сетью персональных компьютеров.

Выше АСУ ТП в пирамиде автоматизации находится система организации производства MES (англ. Manufacturing Execution System) и система планирования производственных ресурсов предприятия ERP (англ. Enterprise Resource Planning). MES производит последовательный анализ информации о процессе изготовления готового продукта на всех участках предприятия, обеспечивает управление качеством и отображает в настоящем времени информацию для необходимых уровней управления предприятием. ERP

предназначена для автоматизации планирования производства и финансовой деятельности, снабжения и продаж, анализа и прогнозирования. [8]

Архитектурная иерархия систем управления построена на 5 уровнях автоматизации. Эти уровни помогают увидеть взаимосвязи между разными элементами системы. Рассмотрим архитектуру автоматизации толкателя методической печи.

Система автоматизации толкателя печи будет состоять из трёх уровней:

Первый уровень – полевой. В него войдут датчики, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, а также защита привода – предохранители, тепловое реле и реле тока. Этот уровень реализуется выше написанными устройствами. Сигналы с датчиков отправляются в систему управления, она в свою очередь подаёт нужную команду и отправляет её на исполнительный механизм.

Второй уровень – логический. Программируемый логический контроллер получает данные о технологическом процессе с первого уровня, а после, следуя своей программе, подаёт нужную команду на исполнительный механизм.

Третий уровень подразумевает визуальное управление системой. В него входят HMI и SCADA системы. Они представляют собой операторские и диспетчерские станции. На данном уровне все собранные данные с первого уровня, команды со второго представлены на панели оператора, откуда он уже осуществляет связь между всеми устройствами системы и контролирует технологический процесс.

Общий вид архитектуры системы автоматизации представлен на рисунке 2.2.

Преобразователь частоты связан с программируемым логическим контроллером через сеть FieldBus.

Программируемый логический контроллер передаёт информацию в SCADA систему по соединению сети Ethernet.

Датчики подсоединены к программируемому логическому контроллеру через интерфейс RS-485 и связываются по встроенному интерфейсу ПЛК MTI.

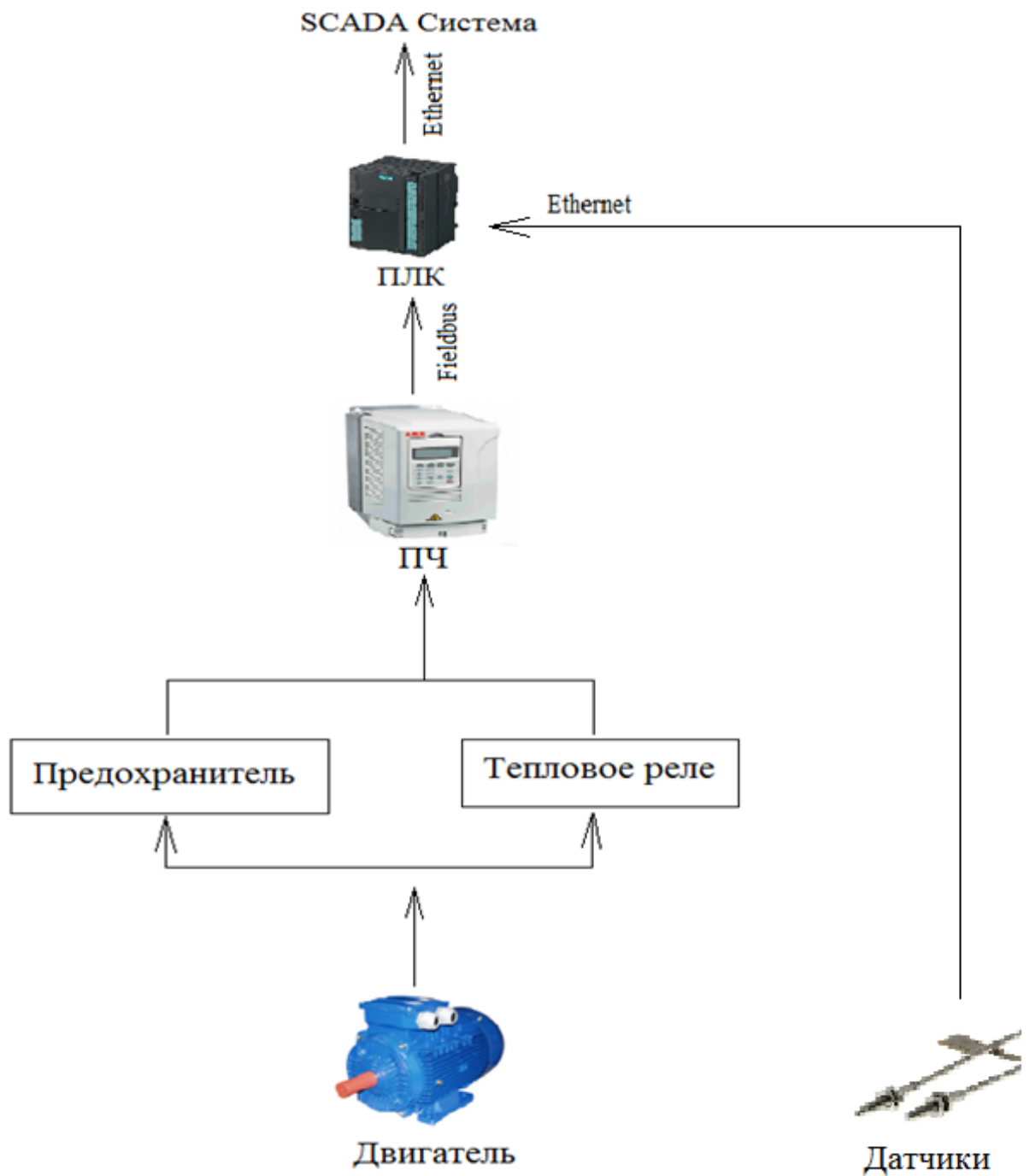


Рисунок 2.2 Архитектура системы автоматизации

## 2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

Автоматизированная система управления регулируется контроллером и датчиками. Выберем подходящее оборудование.

## 2.2.1 Программируемый логический контроллер

Выбран программируемый логический контроллер Simatic S7-300 CPU 314c-2 pn/dp 6ES7314-6EH04-0AB0. Этот контроллер предназначен для построения небольших систем управления со скоростной обработкой информации. Он имеет возможность подключения до 31 модуля S7-300 на систему локального ввода-вывода. Имеет 24 встроенных дискретных входа, 16 дискретных выходов, 4 аналоговых входа для измерения унифицированных сигналов тока или напряжения, 1 аналоговый вход для подключения датчика температуры и 2 аналоговых выхода. Также имеет встроенный интерфейс MPI и интерфейс ведущего/ведомого устройства PROFIBUS DP. [9]

Внешний вид контроллера представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3. Контроллер CPU 314c-2

Основные технические характеристики контроллера представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики контроллера

Характеристика	Значение
Версия операционной системы	V3.3
Напряжение питания	24 В
Номинальный потребляемый ток	190 мА
Пусковой ток	5 А
Потери мощности	14 Вт
РАМ-память	192 кбайт
Тип встроенных интерфейсов MPI и PROFIBUS DP	RS 485
Измерение частоты	4x60 кГц
Габариты	120x125x130
Масса	0,73 кг

### 2.2.2 Блок питания

Так как эффективная работа любого оборудования требует стабильного и непрерывного электропитания, выберем надёжный блок питания SITOP.

Эти блоки питания регулируемые, то есть они могут выдавать не только регулируемые 24 В, но также и другие уровни напряжения. Даже в случае значительных перепадов входного напряжения, выходное остаётся неизменным с высокой точностью.

Также данные блоки питания компактны и отличаются высоким коэффициентом полезного действия и высокой нагрузочной способностью.

Сделаем выбор в пользу модели SITOP 6EP1331-5BA10. [10]

Основные технические характеристики блока питания сведены в таблице 2.2.

Внешний вид блока питания представлен на рисунке 2.4.

Таблица 2.2. Технические характеристики блока питания SITOP

Характеристика	Значение
Номинальный входной ток	0,63А
Номинальное выходное напряжение	24В
Номинальный выходной ток	1,3А
Номинальный КПД	86%
Потребление без нагрузки	<0,75Вт
Электронная защита от КЗ	Да, перезагрузка
Защита от радиопомех	Класс В
Уровень защиты	IP20
Рабочая температура	-20...+70°C
Габариты	30x80x100
Масса	0,17кг



Рисунок 2.4. Блок питания SITOP

### 2.2.3 Выбор датчиков

Для создания контура обратной связи предлагается установить оптические датчики в качестве датчиков обратной связи по положению.

В сравнении с широко применяемыми в промышленности бесконтактными емкостными, индуктивными и ультразвуковыми датчиками положения, а также механическими концевыми выключателями оптические датчики положения имеют ряд преимуществ.

Первое это бесконтактный метод контроля положения и перемещения объекта. Как следствие отсутствует механический износ, дребезг контактов и ложные срабатывания.

Широкий диапазон срабатывания и обнаружения объекта, который зависит от выбора типа датчика.

Возможность обнаружения объектов из различных материалов. Если индуктивные и емкостные датчики накладывают определенные ограничения на такие характеристики контролируемого объекта как магнитные свойства и диэлектрическая проницаемость, то оптические датчики, при соответствующей настройке, с успехом обнаруживают объекты практически из любого материала.

Возможность обнаружения объектов с очень высокой температурой, например, литья, поковок, проката и так далее. Нечувствительность к магнитным полям, электростатическим помехам. Нечувствительность к ионизирующему излучению и возможность установки в крайне стесненном пространстве.

Принцип действия оптических датчиков положения основан на измерении степени ослабления оптического луча, прошедшего путь от излучателя до приемника, являющихся частями датчика. Для повышения помехозащищенности и снижения влияния внешних источников освещения в оптических датчиках положения обычно используется модулированное излучение -луч излучателя датчика пульсирует с частотой от 5 до 30 кГц. Излучатель датчика состоит из излучающего светодиода и питающего его генератора последовательности

импульсов. В датчиках применяют светодиоды, которые испускают импульсы света в спектре от видимого зеленого света до невидимого инфракрасного излучения в зависимости от сферы применения датчика. Излучатель, кроме того, может иметь регулировки интенсивности излучения и индикатор работы. Приемник состоит из фотодетектора (фотодиода), демодулятора, порогового устройства (триггера) и выходных цепей. При необходимости приемник оснащается регулятором чувствительности и индикатором работы.

К волоконно-оптическим датчикам сейчас предъявляются очень высокие требования, потому что они в основном используются в системах с высокими температурами и агрессивными средами. В таких системах требуется высокая точность измерения и ограниченные условия монтажа.

Современные волоконно-оптические датчики состоят из двух составляющих: головки волоконно-оптических датчиков и оптоволоконных усилителей.

Выберем волоконно-оптические датчики OMRON модели E32-T61-S 5M теплостойкие.

Теплостойкие головки волоконно-оптических датчиков отличаются высочайшей степенью защиты и обеспечивают продолжительный срок службы датчиков в жестких условиях эксплуатации. [11]

Спиральное покрытие из нержавеющей стали обеспечивает гибкость и самую высокую степень механической защиты.

Технические характеристики датчика представлены в таблице в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Технические характеристики датчика

Характеристика	Значение
Дальность действия, м	До 6 м
Максимальный ток, мА	50
Термоустойчивость	До 350 градусов
Степень защищённости	IP67

Внешний вид датчика представлен на рисунке 2.4.





Рисунок 2.4. Головка оптоволоконного оптического датчика

Геометрические размеры датчика представлены на рисунке 2.5.

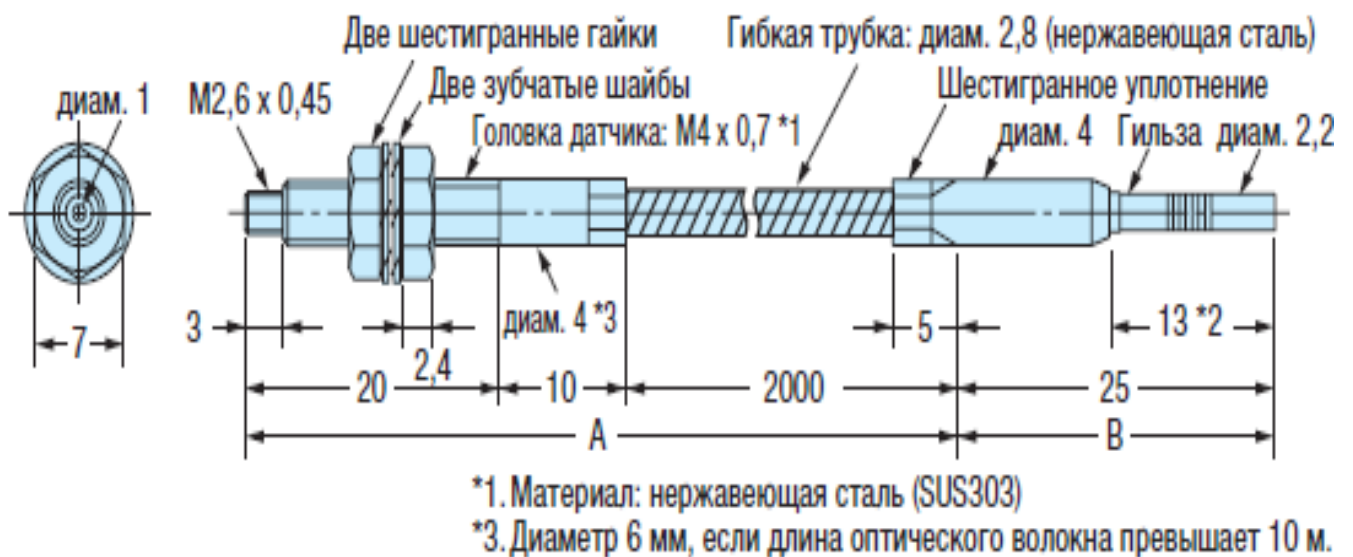


Рисунок 2.5. Размеры датчика

#### 2.2.4 Абсолютный энкодер

Под абсолютными энкодерами подразумевают датчики угла поворота, каждому положению вала которых соответствует определённый уникальный код, формируемый на его выходе. Отслеживание положения вала происходит даже при отсутствии напряжения питания, а сигнал положения передаётся в виде цифрового кода. Способность контроля положения вала даже при выключенном напряжении питания является основной причиной использования абсолютных датчиков угла положения в системах с высокими требованиями точности и безопасности.

Преимущества абсолютных энкодеров в следующем: такой энкодер запоминает свое положение после отключения питания и предлагает постоянный контроль положения.

Обычно абсолютные энкодеры имеют функции измерения скорости, масштабирования, предустановки и полевой шины.

Такой энкодер позволяет определить точное положение машины и контролировать хранение электронных данных.

АЭ имеют несколько опций интерфейса: аналоговый, Ethernet, Fieldbus, параллельный, последовательный, что позволит не использовать дополнительные устройства для подключения к контроллеру.

Абсолютные энкодеры имеют диск, на котором кроме меток обычного инкрементального датчика имеются дополнительные метки или прорези, для вычисления абсолютного положения. Каждая позиция соответствует уникальному коду, и даже движения, которые происходят, когда нет питания, записываются в точные значения положения и могут быть восстановлены сразу после подключения питания.

Существует два типа абсолютных датчиков: однооборотные и многооборотные энкодеры. Однооборотные датчики измеряют перемещения за

один оборот или поворот на 360 градусов от начального положения. Процесс повторяется после каждого оборота. Многооборотные датчики измеряют то же самое, что и однооборотные, но также отслеживают количество полных оборотов вала, используя уникальное слово для каждой позиции и количества оборотов. Устройство абсолютного энкодера представлено на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6. Абсолютный энкодер

Однооборотные датчики более полезны для коротких перемещений. Многооборотные лучше подходят для более сложных или более длинных перемещений. [12]

Выберем абсолютный энкодер AFS/AFM60 Ethernet/IP.

Его технические характеристики сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4. Характеристики энкодера

Характеристика	Значение
Число шагов на оборот	4096
Число оборотов	256000
Поддерживаемый интерфейс	Ethernet
Напряжения питания	10-30В

Внешний вид выбранного энкодера представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7. Абсолютный энкодер

### 2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода

Технологический процесс толкателя печи требует регулирование скорости и положения. Поэтому в системе управления будет два контура регулирования – внутренний контур скорости и внешний контур положения.

Рассмотрим технологический процесс в виде сигналов.

Сигнал задания на положение поступает в регулятор положения. Далее он поступает в регулятор скорости. Блок ограничения нужен для исключения аварийных ситуаций. Далее сигнал приходит в контур момента. В качестве обратной связи по положению выступает оптический датчик. В качестве обратной связи по скорости – абсолютный энкодер.

Функциональная схема САР толкателя печи представлена на рисунке 2.8.

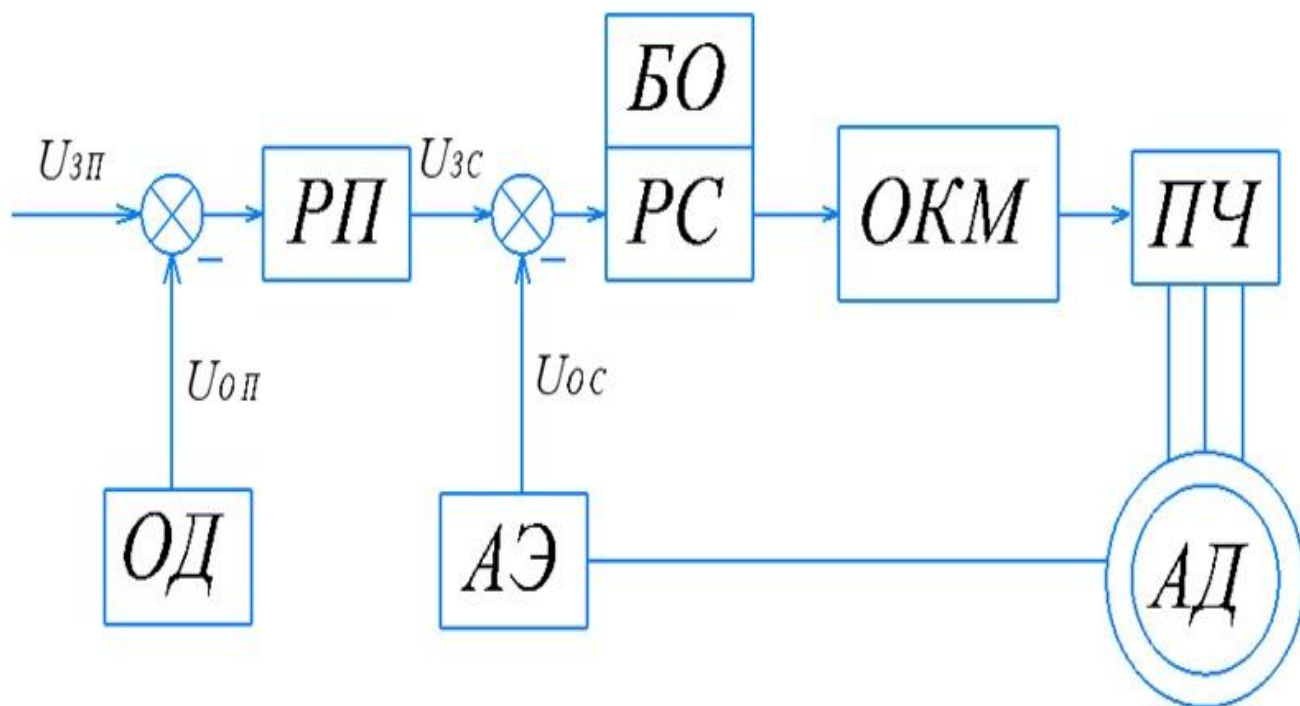


Рисунок 2.8. Функциональная схема САР электропривода толкателя  
 РП – регулятор положения, РС – регулятор скорости, БО – блок ограничения, ОКМ – оптимизированный контур момента, ПЧ – преобразователь частоты, АД – асинхронный двигатель, АЭ – абсолютный энкодер, ОД – оптический датчик

#### 2.4 Разработка контуров регулирования технологических координат

Для механизма будет реализована двухконтурная САР с основным внешним контуром регулирования положения и внутренним подчиненным контуром регулирования скорости.

Сигнал задания на положение приходит на регулятор положения. Внешний контур регулирования положения состоит из регулятора положения, внутреннего контура скорости и оптического датчика в качестве датчика обратной связи по положению. Далее сигнал идет в регулятор скорости. Внутренний контур скорости состоит из регулятора скорости, блока ограничения, преобразователя частоты, двигателя и абсолютного энкодера в качестве датчика обратной связи. Блок ограничения нужен для ограничения выходной координаты регулятора скорости – тока, чтобы исключить аварийные ситуации. [13]

## 2.5 Разработка структурной схемы САР и моделирование типовых режимов работы

Преобразователь частоты, статорную цепь АИР можно представить как замкнутый контур момента.

Постоянную времени примем равную 0,005с.

Передаточная функция оптимизированный контура момента будет представлена аperiodическим звеном 1 порядка:

$$W_{\text{окм}} = \frac{1/K_{\text{ом}}}{2T_{\mu}P + 1} \quad (48)$$

где  $T_{\mu} = 0,005\text{с}$  – постоянная времени преобразователя частоты;  $K_{\text{ом}}$  – коэффициент обратной связи по моменту.

Коэффициент обратной связи по моменту считается следующим образом:

$$K_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{зм}}}{M_{\text{м}}} = \frac{10}{146,8} = 0,068, \quad (49)$$

где  $U_{\text{зм}}$  – сигнал задания на момент, В;  $M_{\text{м}}$  – максимальный момент двигателя, Нм.

Тогда передаточная функция оптимизированного контура момента будет равна:

$$W_{\text{окм}} = \frac{1/0,068}{0,01 \cdot p + 1} \quad (50)$$

Выбран пропорционально-интегральный регулятор скорости (ПИ-регулятор), настроенный на симметричный оптимум со следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{pc}}(p) = K_{\text{pc}} + \frac{K_{\text{pc}}}{8T_{\mu}p}, \quad (51)$$

где  $K_{\text{pc}}$  - коэффициент регулятора скорости.

После подбора коэффициентов регулятора скорости и оптимизации внутреннего контура момента, составим структурную схему САР толкателя, представленную на рисунке 2.9.

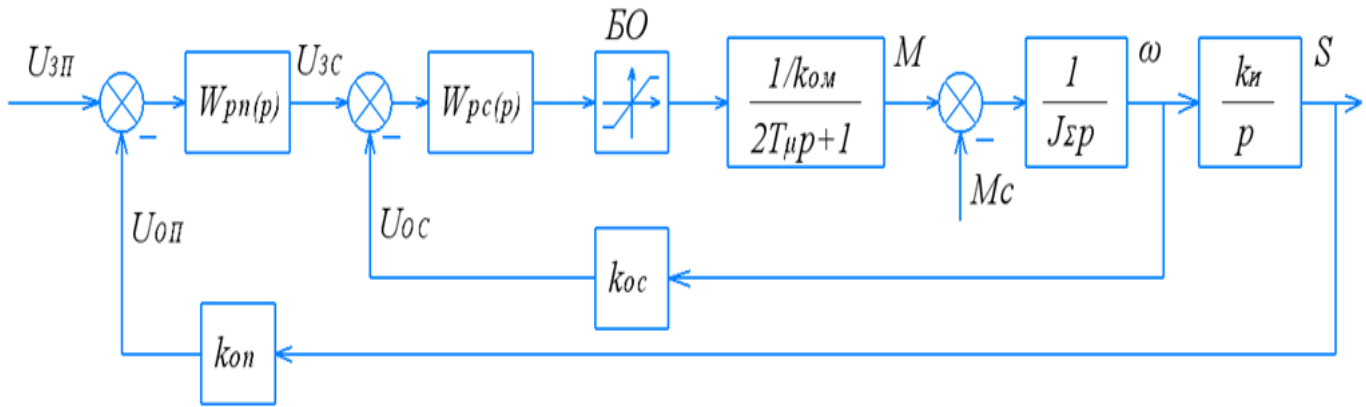


Рисунок 2.9. Структурная схема САР толкателя

Так как при прямом ходе и обратном установившаяся скорость должна быть разной, то коэффициенты обратной связи также будут разными для каждого из случаев.

Переключение между коэффициентами реализуется изменением знака входного сигнала.

Коэффициент обратной связи по скорости при прямом ходе:

$$k_{ос} = \frac{U_{\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{50} = 0,2 \quad (52)$$

Коэффициент обратной связи по скорости реверсе:

$$k_{ос} = \frac{U_{\max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{75} = 0,133 \quad (53)$$

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

Коэффициент обратной связи по положению:

$$k_{он} = \frac{U_{\max}}{S_{\max}} = \frac{10}{8} = 1,25 \quad (54)$$

где  $S_{\max}$  – расстояние, которое проходит толкатель, м.

Коэффициент регулятора скорости:

$$K_{pc} = \frac{J_{\Sigma} k_{ом}}{4T_{\mu} k_{ос}} = \frac{0,263 \cdot 0,068}{4 \cdot 0,005 \cdot 0,133} = 6,72 \quad (55)$$

где  $J_{\Sigma}$  – минимальный суммарный момент инерции, кг·м<sup>2</sup>.

Таким образом, передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = K_{pc} + \frac{K_{pc}}{8T_{\mu}p} = 6,72 + \frac{6,72}{8 \cdot 0,005p} = 87,56 + \frac{168}{p} \quad (56)$$

Передаточная функция звена механической части является интегрирующим звеном с коэффициентом обратно пропорциональным суммарному моменту инерции. Суммарный момент инерции при прямом и обратном ходе меняется, это реализовано с помощью переключения с первого звена на второе при изменении знака входного сигнала. Расчет передаточных функций звеньев механической части:

$$W_{M1}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma 1} \cdot p} = \frac{1}{0,355p} \quad (57)$$

$$W_{M1}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma 1} \cdot p} = \frac{1}{0,263p} \quad (58)$$

Для преобразования скорости из угловой в линейную необходимо следующее звено:

$$k_{и} = \frac{D}{2 \cdot i_{ред}} = \frac{0,5}{2 \cdot 50} = 0,005 \quad (59)$$

где  $D$  – диаметр речной шестерни, м;  $i_{ред}$  – передаточное число редуктора.

После преобразующего звена необходим интегратор для преобразования линейной скорости в перемещение.

Для расчёта нелинейного регулятора положения необходимо определить границы малых, средних и больших перемещений  $\Delta U_{п(мин)}$  и  $\Delta U_{п(макс)}$ .

Зависимость выходного сигнала регулятора положения от входного представлена на рисунке 2.10.



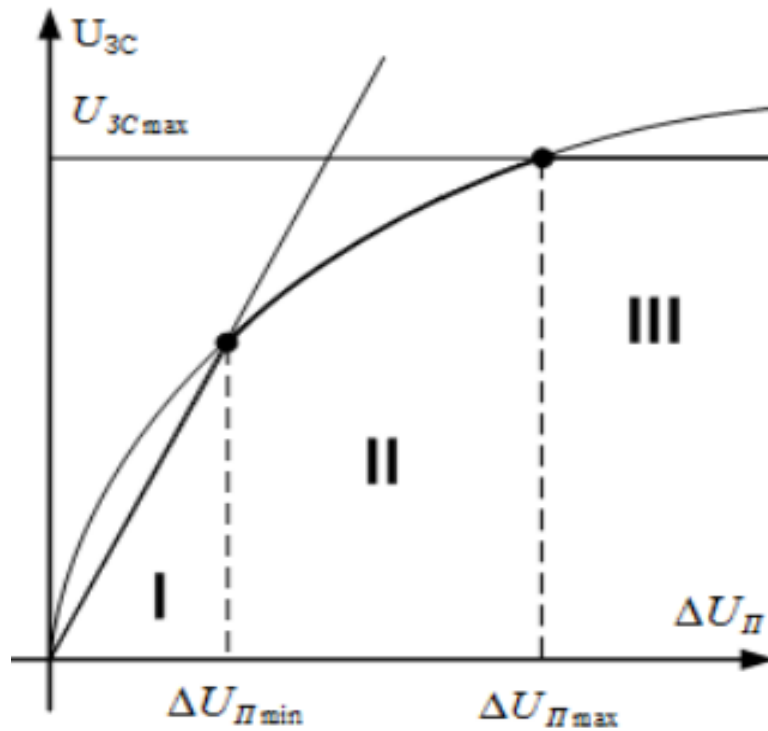


Рисунок 2.10. Зависимость выходного сигнала регулятора положения от входного

$U_{3c}$  – сигнал задания скорости;

$\Delta U_{\text{П}}$  – сигнал на входе регулятора положения;

Область I – область малых перемещений, где  $U_{3c} = K_{\text{рпм}} \cdot \sqrt{\Delta U_{\text{П}}}$ ;

Область II – область средних перемещений, где  $U_{3c} = K_{\text{рпс}} \cdot \sqrt{\Delta U_{\text{П}}}$ ;

Область III – область больших перемещений, где  $U_{3c} = U_{3c\text{max}}$ .

$\Delta U_{\text{П(мин)}}$  и  $\Delta U_{\text{П(макс)}}$  определяются по формулам:

$$\Delta U_{\text{П(мин)}} = 2\varepsilon_{\text{макс}} k_{\text{оп}} k_{\text{и}} (16T_{\mu})^2, \quad (60)$$

$$\Delta U_{\text{П(макс)}} = \frac{\omega_{\text{ном}}^2 k_{\text{оп}} k_{\text{и}}}{2\varepsilon_{\text{макс}}}, \quad (61)$$

где  $\varepsilon_{\text{макс}}$  – максимальное ускорение, рад/с<sup>2</sup>.

Максимальное ускорение рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{макс}} = \frac{\lambda_{\text{дв}} \cdot M_{\text{н}} - M_{\text{с}}}{J_{\Sigma}} = \frac{146,8 - 122,6}{0,488} = 49,52 \text{ рад/с}^2 \quad (62)$$

где  $\lambda_{\text{дв}}$  – перегрузочная способность двигателя;  $M_{\text{н}}$  – номинальный момент двигателя, Н·м;  $M_{\text{с}}$  – максимальный статический момент, Н·м;  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции всей системы, кг / м<sup>2</sup>.

Расчет границы малых перемещений:

$$\Delta U_{\text{п(мин)}} = 2 \cdot 49,52 \cdot 1,25 \cdot 0,005 \cdot (16 \cdot 0,005)^2 = 0,004 \text{ В} \quad (63)$$

Расчет границы средних перемещений:

$$\Delta U_{\text{п(макс)}} = \frac{74,84^2 \cdot 1,25 \cdot 0,005}{2 \cdot 49,52} = 0,35 \text{ В} \quad (64)$$

Коэффициент регулятора перемещений при малых перемещениях ( $U_{\text{с}} \leq 0,004 \text{ В}$ ):

$$K_{\text{РПМ}} = \frac{0,133}{16 \cdot 0,005 \cdot 1,25 \cdot 0,005} = 266. \quad (65)$$

Коэффициент регулятора перемещений при средних перемещениях ( $0,004 \text{ В} < U_{\text{с}} < 0,35 \text{ В}$ ):

$$K_{\text{РПС}} = k_{\text{ос}} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{макс}}}{k_{\text{оп}} k_{\text{и}}}} = 0,133 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 49,52}{1,52 \cdot 0,005}} = 16,74. \quad (66)$$

В области больших перемещений ( $U_{\text{с}} \geq 0,35 \text{ В}$ ) регулятор положения выдает сигнал, равный максимальному значению сигнала задания,  $\pm 10 \text{ В}$ .

Реализация функции нелинейного регулятора положения представлена на рисунке 2.11.

Реализация функции пропорционально-интегрального регулятора скорости представлена на рисунке 2.12.

Сигнал задания статического момента представлен на рисунке 2.13.

Сигнал задания на положение представлен на рисунке 2.14.

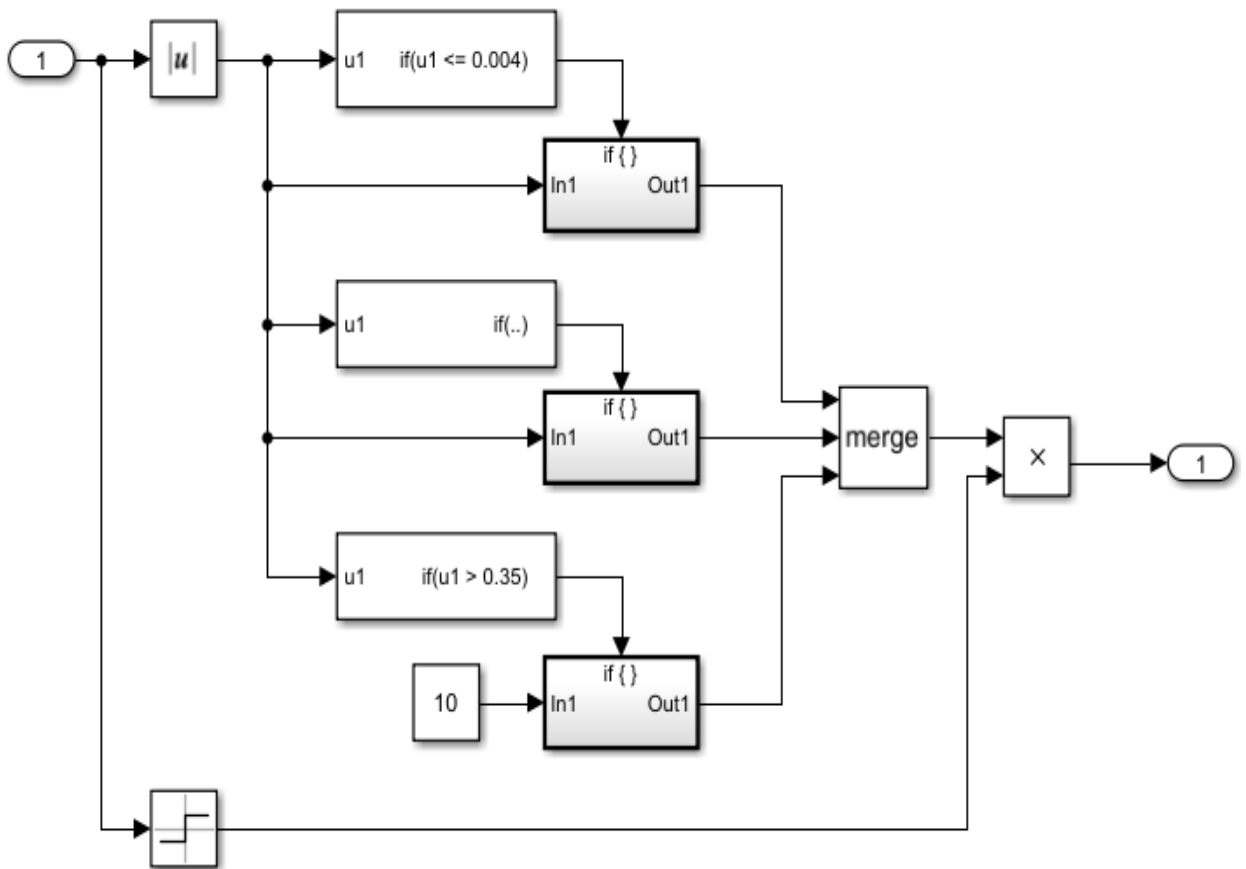


Рисунок 2.11. Нелинейный регулятор положения

Controller: **PI** Form: **Parallel**

Time domain:  
 Continuous-time  
 Discrete-time

Main **PID Advanced** Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal** [Compensator formul](#)

Proportional (P): **6.72**

Integral (I): **168**  $P + I \frac{1}{s}$

Select Tuning Method: **Transfer Function Based (PID Tuner App)** **Tune...**

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator: **0**

External reset: **none**

Ignore reset when linearizing

Рисунок 2.12. ПИ регулятор скорости

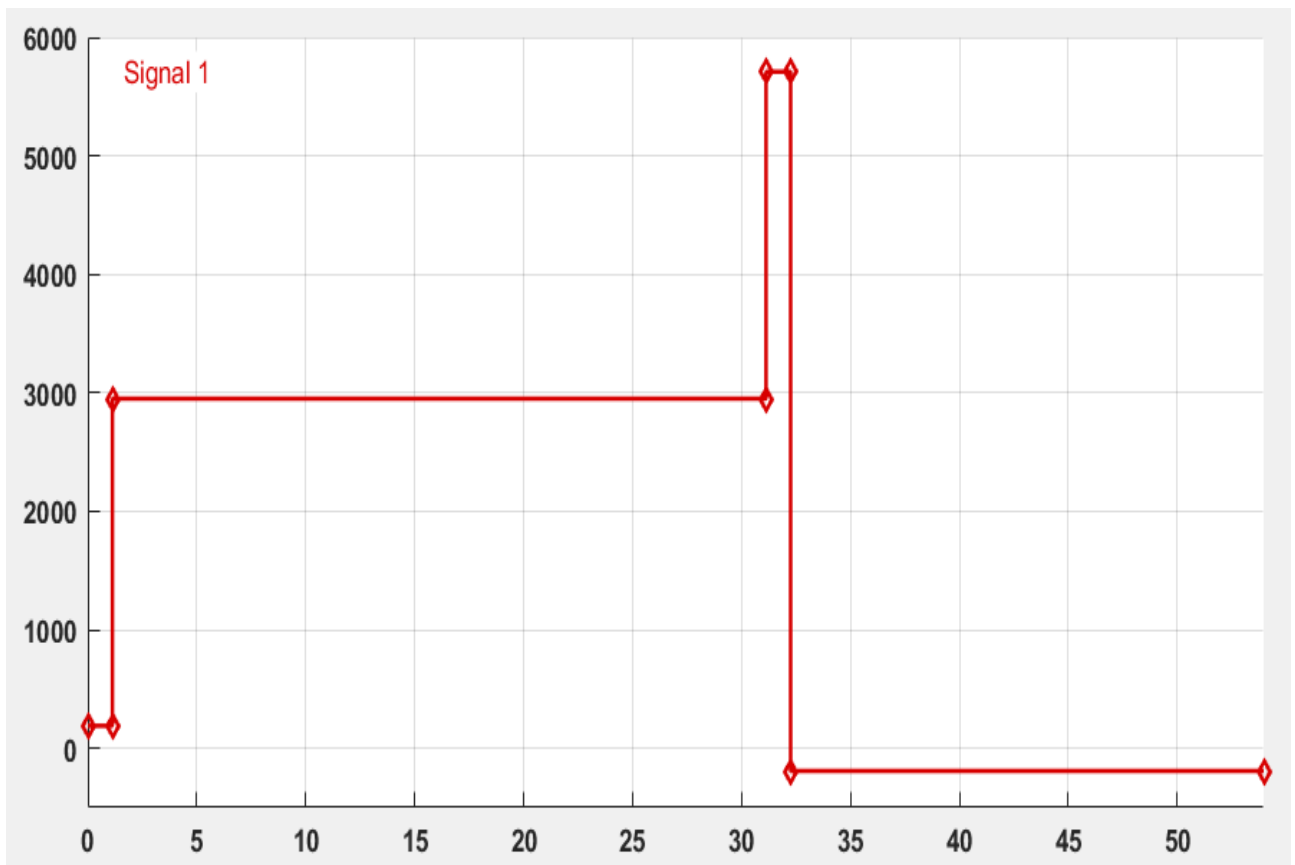


Рисунок 2.13. Сигнал задания статического момента

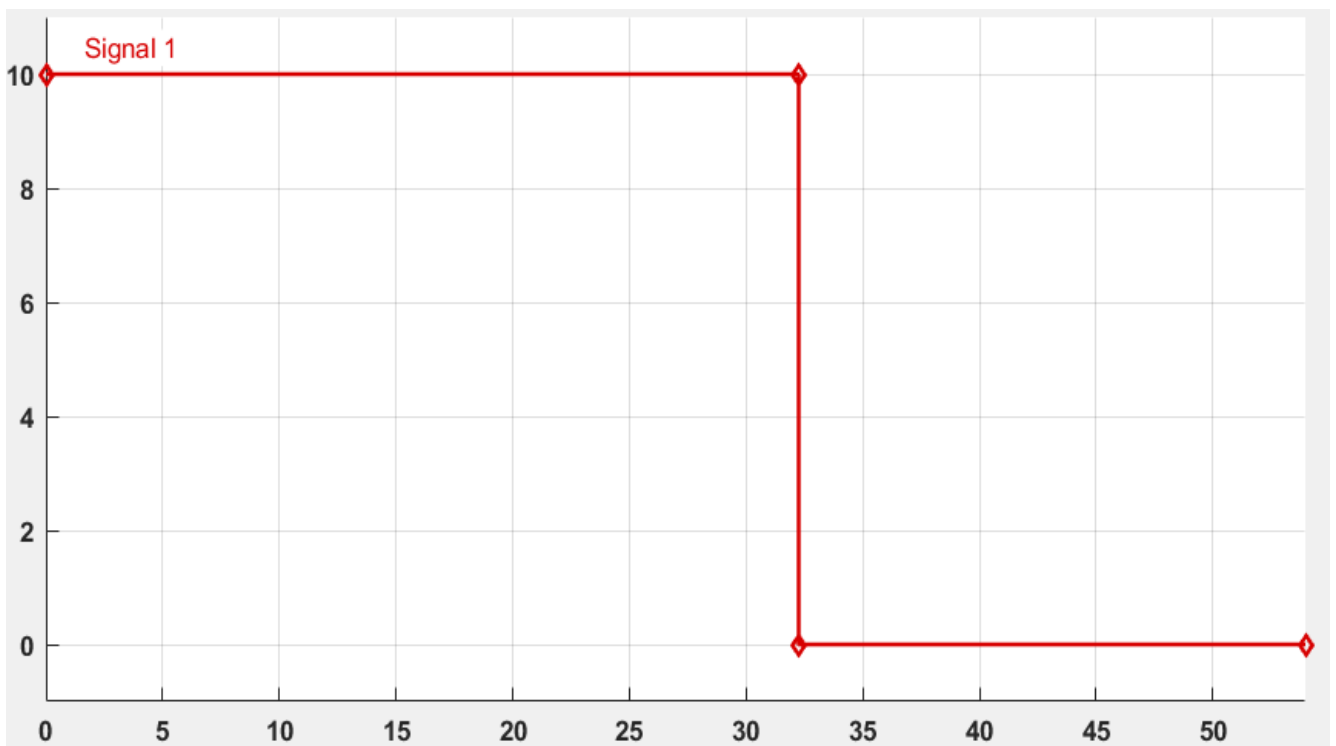


Рисунок 2.14. Сигнал задания на перемещение

Типовым режимом работы являются большие перемещения. Отработка больших перемещений характеризуется тем, что скорость и момент достигают установившегося значения. Тахограмма имеет форму трапеции с заданным значением ускорения и замедления. В режиме больших перемещений ограничивается ток якоря двигателя и заданная установившаяся скорость.

Переходный процесс перемещения представлен на рисунке 2.14.

Тахограмма привода представлена на рисунке 2.15.

Переходный процесс суммарного момента толкателя представлен на рисунке 2.16.



Рисунок 2.14. Перемещение толкателя

По осциллограмме на рисунке 2.14 видно, что с начала отсчёта времени и до определённого момента толкатель движется вперед на расстояние равно 8 м, а после начинает реверс и возвращается в исходное положение.

В начале и в конце пути при прямом ходе график имеет нелинейный характер. Он выглядит как часть параболы. Это происходит из-за отработки средних перемещений



Рисунок 2.15. Тахограмма привода

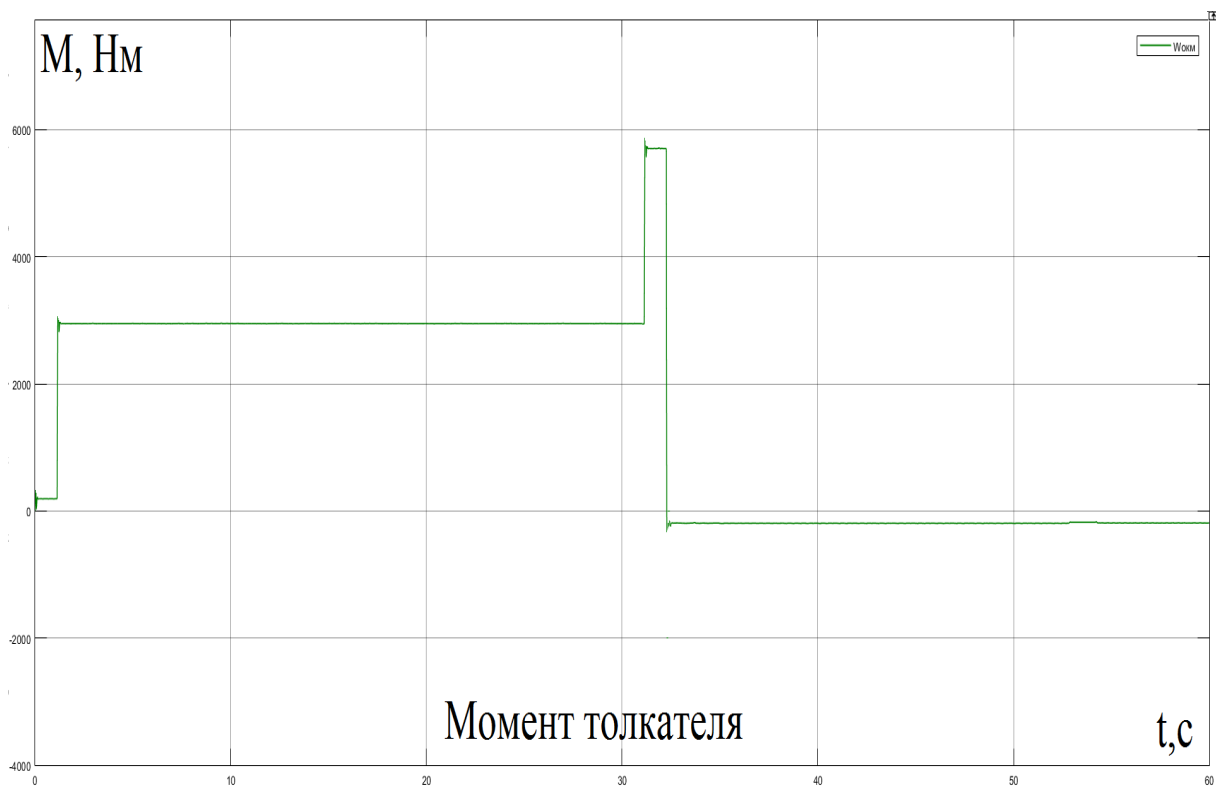


Рисунок 2.16. Суммарный момент толкателя

Математическая модель САП, выполненная в Matlab Simulink, представлена на рисунке 2.17.



## 3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ

### 3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции

ЧМК выпускает широкий сортамент продукции металлургического производства: чушковый чугун, полуфабрикаты стальные для дальнейшего передела, сортовой и листовой металлопрокат из углеродистых, конструкционных, инструментальных и коррозионно-стойких марок стали, фасонный прокат и рельсовую продукцию.

Основная продукция комбината – катанка, арматурный прокат периодического профиля, бунтовой прокат из конструкционной стали, сортовой прокат для трубопрокатных и машиностроительных заводов, а также сортовая квадратная заготовка.

В выпускной квалификационной работе будет проведён расчёт модернизации толкателя методической печи. Толкатель печи – это вспомогательное оборудование, для обслуживания методических печей прокатных станов. Толкатель печи предназначается для сталкивания заготовок с рольгангов в методическую печь для последующего их нагрева. Принцип работы толкателя: заготовка по подающим и направляющим рольгангам доставляется в зону работы толкателя, где толкатель двигает сляб или блюм (заготовку) в печь.

### 3.2 Расчёт производственной программы цеха

Расчет производственной программы цеха начинается с расчета баланса времени работы толкателя. При этом рассчитывается календарное, номинальное и фактическое время работы за год. [17]

Календарным временем считается все время нахождения стана в эксплуатации, независимо от времени ремонтов и технологических простоев. Так как толкатель печи находится в работе круглый год (365 суток), то в пересчёте на часы календарное время  $T_{\text{кал}}$  составит 8760 часов.



Толкатель работает и в праздничные дни и в выходные, поэтому номинальное время определяется исключением из календарного времени простоев на капитальных и текущих ремонтах:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{кр}} - T_{\text{тр}} = 8760 - 720 - 504 = 7536 \text{ч}, \quad (67)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – время, затраченное на капитальные ремонты, ч;  $T_{\text{тр}}$  – время, затраченное на текущие ремонты, ч.

Фактическое время находится исключением из номинального времени внеплановых текущих простоев и аварий:

$$T_{\text{ф}} = T_{\text{ном}} - T_{\text{пр}} = 7536 - 960 - 216 = 6360 \text{ч}, \quad (68)$$

где  $T_{\text{пр}}$  – время, затраченное на текущие простои, ч.

Баланс рабочего времени приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Баланс рабочего времени агрегата

Плановые ремонты		Номинальное время $T_{\text{ном}}$ , ч		
Капремонт $T_{\text{кр}}$ , ч	Текущие $T_{\text{тр}}$ , ч	Текущие простои $T_{\text{пр}}$ , ч		Фактическое время $T_{\text{ф}}$ , ч
		Внеплановые ремонты и простои $T_{\text{впр}}$ , ч	Аварии $T_{\text{ав}}$ , ч	
720	504	960	216	6360

За счёт установки датчиков во всей системе для полной автоматизации процесса планируется уменьшение затрат на ремонты, а также небольшое увеличение производительности и, соответственно, прибыли за счет уменьшения среднего времени отправки одного сляма в печь на 22%.

Среднее время одного цикла 189 с. Объем производства при ручном труде – 138 072 заготовок в год.

Расчет производительности цеха после модернизации: годовой объем производства продукции определяется производительностью агрегата в единицу рабочего времени и фондом рабочего времени:

$$ПР2 = ПР \cdot T_{\text{ф}}, \quad (69)$$

где ПР – средняя производительность заг/ч;  $T_{\phi}$  – годовой фактический фонд рабочего времени, ч.

Средняя часовая производительность определяется по формуле:

$$ПР = \frac{3600 \cdot K_r \cdot K_n}{t} = \frac{3600 \cdot 0,94 \cdot 0,92}{211 \cdot (1 - 0,3)} = 22 \text{ заг / ч}, \quad (70)$$

где  $K_r$  – коэффициент выхода годного;  $K_n$  – коэффициент использования;  $t$  – среднее время отправки одной заготовки в печь, с.

Годовой объем производства продукции определяется производительностью агрегата в единицу рабочего времени и фондом рабочего времени:

$$ПР2 = 22 \cdot 6360 = 139920 \text{ заг/год}. \quad (71)$$

Данные по производственной программе сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Расчет производственной программы цеха

Показатель	Величина	
	До модернизации	После модернизации
Среднее время отправки одной заготовки в печь $t$ , с	189	148
Производительность ПР, заг/год	138 072	139 920

### 3.3 Расчет сметы капитальных затрат

Капитальные затраты на разработку и внедрение новой технологии включают все единовременные вложения. К ним относятся затраты на разработку проекта новой системы автоматизации, затраты на приобретение, доставку, монтаж и наладку нового оборудования. [16]

Рассчитаем необходимую сумму капитальных затрат.

Расчет капитальных затрат  $K$  выражается через формулу:

$$K = O + M + T_p, \quad (72)$$

где  $O$  – затраты на приобретение оборудования, руб.;  $M$  – затраты на монтаж, руб.;  $T_p$  – транспортные расходы, руб.

### 3.3.1 Расчёт стоимости приобретённого оборудования

Перечень необходимого оборудования устанавливается на основании спецификации. Цены на основное оборудование принимаются из прейскуранта оптовых цен предоставленных производителями.

Для реализации предлагаемой модернизации необходимо приобрести: программируемый логический контроллер, блок питания для контроллера, понижающий трансформатор, оптические датчики OMRON и остальное неучтённое оборудование (кабели, проводка и прочее мелкое оборудование).

Расчёт стоимости приобретённого оборудования представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Кол-во шт.	Цена за единицу продукции, руб.	Общая стоимость, руб.
ПЛК Simatic S7-300 CPU 314	1	347 406	347 406
Блок питания SITOP	1	15412	15412
Понижающий трансформатор с 380В до 24В	1	7424	7424
Оптический датчик OMRON	7	34671	242 697
Прочее неучтённое оборудование	1	306 469	306 469
Итого, руб.:			919 408

Стоимость неучтённого оборудования (кабели, проводка и прочее мелкое оборудование) принимается в размере 20% от стоимости учтённого оборудования.

### 3.3.2 Расчет затрат на монтаж оборудования

Затраты на монтаж оборудования и пуско-наладочные работы определены в размере 20% от стоимости оборудования:

$$M = 919408 \cdot 0,2 = 193882 \text{руб.} \quad (73)$$

### 3.3.3 Расчет величин транспортных расходов

Транспортные расходы берутся в размере 15% от стоимости оборудования:

$$T_p = 919408 \cdot 0,15 = 138911 \text{руб.} \quad (74)$$

Итого капитальные затраты составляют:

$$K = 919408 + 193882 + 138919 = 1252209 \text{руб.} \quad (75)$$

## 3.4 Расчёт общего фонда оплаты

Общий фонд оплаты труда со страховыми отчислениями можно вычислить по следующей формуле:

$$\text{Офо} = \text{ЗП} + \text{Осоц}, \quad (76)$$

где ЗП – фонд заработной платы, руб.; Осоц – отчисления на социальные нужды, руб.

Общий фонд заработной платы складывается из основной и дополнительной заработной платы производственного рабочего – машиниста загрузочных машин 6 разряда. График работы – непрерывный, двухсменный, в течение смены работает 1 человек. Всего работают 4 человека. Часовая тарифная ставка 120 руб./ч.

Основная заработная плата всех рабочих за один год составляет:

$$ЗП = T_{\phi} \cdot C = 6360 \cdot 120 = 763200 \text{руб} / \text{год}, \quad (77)$$

где  $C$  – часовая тарифная ставка рабочего, руб/ч.

Выплаты компенсационного характера: доплата за работу в ночное время составляет 15% от оклада, доплата за работу в праздничные дни 6%, доплата за вредные условия труда 9% от основной заработной платы:

$$\text{КОМП} = 763200 \cdot (0,15 + 0,06 + 0,09) = 228960 \text{руб} / \text{год}. \quad (78)$$

Выплаты стимулирующего характера примем 10% от основной заработной платы:

$$\text{СТИМ} = 763200 \cdot 0,1 = 76320 \text{руб} / \text{год}. \quad (79)$$

Премияльные отчисления установлены в размере 40% от размера заработной платы:

$$\text{ПРЕМ} = 763200 \cdot 0,4 = 305280 \text{руб} / \text{год}. \quad (80)$$

Дополнительная заработная плата (неиспользованный отпуск, оплата больничных листов) принимается в размере 10%:

$$\text{ДОП} = 763200 \cdot 0,1 = 76320 \text{руб} / \text{год}. \quad (81)$$

Итого в годовом фонде оплаты труда с учётом всех премий и выплат:

$$ЗП = 763200 + 228960 + 76320 + 305280 + 76320 = 1450000 \text{руб} / \text{год}. \quad (82)$$

Годовой фонд оплаты труда с учетом районного коэффициента, равного 1,15:

$$ЗП_{\text{гф}} = 1450000 \cdot 1,15 = 1667500 \text{руб} / \text{год}. \quad (83)$$

Отчисления на социальные нужды принимаются в размере 30% от размера годового фонда оплаты труда. Они включают в себя отчисления в пенсионный фонд, равные 22%, отчисления в федеральный фонд обязательного медицинского страхования, равные 5,1%, территориальный фонд обязательного медицинского страхования, равные 2,9%:

$$\text{Осоц} = 1667500 \cdot 0,3 = 500250 \text{руб} / \text{год}. \quad (84)$$

Таким образом, полные затраты на оплату труда со страховыми отчислениями равны:

$$ЗП = 1667500 + 500250 = 2167750 \text{руб} / \text{год}. \quad (85)$$

После модернизации затраты на оплату труда со страховыми отчислениями остаются прежними.

Итоги расчёта всей заработной платы сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. Расчёт заработной платы

Наименование отчислений	Значение, руб.
Основная заработная плата	763200
Компенсационные выплаты	228960
Стимулирующие выплаты	76320
Премияльные отчисления	305280
Дополнительная заработная плата	76320
Оплата труда с учётом всех выплат	1450000
Оплата труда с учетом районного коэффициента	1667500
Отчисления на социальные нужды	500250
Итого	2167750

### 3.5 Расчет РСЭО

Требуется определить состав и размер эксплуатационных расходов, связанных с работой электрооборудования.

Затраты на эксплуатацию системы электропривода:

$$Z_{э.об.} = Э + А + С_{тр}, \quad (86)$$

где Э – потери электроэнергии, А – амортизационные отчисления, С<sub>тр</sub> – затраты на текущий ремонт и обслуживание электрооборудования.

Стоимость электроэнергии рассчитывается по формуле:

$$Э = P \cdot T_{\phi} \cdot Ц_{э} = 5,5 \cdot 6360 \cdot 3,1 = 108438 \text{руб}, \quad (87)$$

где P – мощность электродвигателя, кВт; Ц<sub>э</sub> – цена за электроэнергию, руб/кВтч.

Сумма затрат на электроэнергию после модернизации не изменится по причине использования старого двигателя с той же мощностью, количество часов работы механизма так же не изменится.

Расчёт годовой суммы амортизационных отчислений производится на основе капитальных затрат на оборудование и нормы амортизации для него. [18]

Срок использования старого оборудования составляет 15 лет. Стоимость старого оборудования составляет примерно 570 000 рублей.

Норма амортизации по старому оборудованию:

$$H_a = 100 / 15 = 6,67\%. \quad (88)$$

Норма амортизации по новому оборудованию:

$$H_a = 100 / 20 = 5\%. \quad (89)$$

Сумма амортизации старого оборудования будет определяться

$$A = \frac{K \cdot H_a}{100\%} = \frac{570000 \cdot 6,7}{100} = 38190 \text{руб.} \quad (90)$$

Сумма амортизации нового оборудования будет определяться:

$$A = \frac{K \cdot H_a}{100\%} = \frac{1252209 \cdot 5}{100} = 62610 \text{руб.} \quad (91)$$

При расчёте величины затрат на ремонты и обслуживание оборудования примем её долю равную 20% от величины амортизации:

Затраты на ремонт до модернизации:

$$C_{\text{тр}} = 38190 \cdot 0,2 = 7638 \text{руб.} \quad (92)$$

Затраты на ремонт после модернизации:

$$C_{\text{тр}} = 62610 \cdot 0,2 = 12522 \text{руб.} \quad (93)$$

Все рассчитанные показатели РСЭО сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5. Расчёт РСЭО

Показатели	Значения, руб.		Отклонение
	До модернизации	После модернизации	
Затраты на электроэнергию	108 438	108 438	0

Продолжение таблицы 3.5.

Показатели	До модернизации	После модернизации	Отклонение
Амортизация	38190	62 610	-24420
Затраты на ремонт	7638	12 522	-4884
Итого	154 266	183 570	-29 304

### 3.6 Расчёт прибыли

Себестоимость одной тонны продукции 35 674 рублей. Средняя цена за тонну горячекатаного листа 37 220 руб.

Расчёт прибыли будет осуществляться по формуле:

$$\Pi = (Ц - C1) \cdot ПР \cdot (1 - Н), \quad (94)$$

где Ц – цена реализации 1 тонны продукции, руб.; C1 – себестоимость 1 тонны продукции, руб.; Н – налог на прибыль, равный 20%.

Прибыль до модернизации:

$$\Pi = (37220 - 35674) \cdot 138072 \cdot (1 - 0,2) = 170,8 \text{ млн.руб.} \quad (95)$$

После модернизации себестоимость продукции изменится в связи с увеличением РСЭО. Новую себестоимость определим по формуле:

$$C2 = \frac{C1 \cdot ПР1 - \Delta РСЭО}{ПР1} = \frac{35674 \cdot 138072 + 29304}{138072} = 35674,21 \text{ руб.} \quad (96)$$

Тогда прибыль после модернизации:

$$\Pi = (37220 - 35674,21) \cdot 139920 \cdot (1 - 0,2) = 173 \text{ млн.руб.} \quad (97)$$

### 3.7 Расчет срока окупаемости

Срок окупаемости рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta\Pi} = \frac{1252209}{(173 - 170,8) \cdot 10^6} = 0,57 \text{ года} = 7 \text{ месяцев.} \quad (98)$$

Таким образом, проект окупается за 7 месяцев.



### 3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчётов

Все экономические показатели приведены в сводной таблице 3.5.

Таблица 3.5. Сводная таблица технико-экономических показателей

Наименование показателя	Значение показателя до модернизации	Значение показателя после модернизации	Разница показателей
Годовой объём производства, ед.	138 072	139 920	1848
Капитальные вложения, руб.	-	1 252 209	-1 252 209
РСЭО, руб.:			
– фонд оплаты труда, руб.	2 167 750	2 167 750	0
– оплата электроэнергии, руб.	108 438	108 438	0
– амортизация, руб.	38 190	62 610	24 420
– затраты на ремонт, руб.	7 638	12 522	4 884
Себестоимость одной единицы продукции, руб.	35 674	35 674,21	0,21
Прибыль, млн. руб./год	170,8	173	2,2
Срок окупаемости	7 месяцев		

Из таблицы 3.5 следует, что в результате реализации проекта происходит увеличение годового объёма производства на 1848 единиц, и, соответственно, увеличение годовой прибыли в 2,2 млн руб. Ежегодная амортизация составляет 62610 руб. Срок окупаемости проекта составляет 7 месяцев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы являлась модернизация мехатронной системы толкателя заготовок методической печи для увеличения эффективности её работы.

В процессе работы были выполнены следующие действия:

Произведён анализ технологического процесса, спроектирована кинематическая схема механизма и сформулированы основные требования к приводу и системе автоматизации.

Проанализированы различные системы привода, приведены их преимущества и недостатки, и, используя изложенные требования к приводу, сделан выбор в пользу электропривода.

На основе известных характеристик механизма найдены усилия, которые будут прикладываться к рабочему органу. По эквивалентному моменту выбран подходящий двигатель АИРМ132М8, после чего были построены нагрузочная диаграмма суммарного момента механизма и тахограмма привода. Сразу же произведена проверка двигателя на нагрев и перегрузочную способность. Выбрано основное силовое оборудование – преобразователь частоты и тормозной резистор, а также выбрана система защиты привода – плавкие предохранители, тепловое реле и реле тока.

При разработке системы автоматического управления была определена архитектура системы автоматизации толкателя печи. Далее выбрано оборудование для сбора данных и управления – оптические датчики, абсолютный энкодер и программируемый логический контроллер. Оборудование совместимо между собой и удовлетворяет требованиям к системе автоматизации.

Была разработана функциональная схема системы управления толкателем, где оптические датчики выполняют роль обратной связи по положению, а абсолютный энкодер выполняет роль обратной связи по скорости. Построены и описаны два контура регулирования координат – внешний контур регулирования

положения и внутренний контур регулирования скорости. На основе функциональной схемы построена структурная схема управления и рассчитаны передаточные функции регуляторов и остальных звеньев. Далее была создана математическая модель системы в среде Matlab Simulink. Снятые переходные процессы доказывают, что разработанная модель системы автоматического управления приводом толкателя является устойчивой и удовлетворяет всем предъявленным требованиям.

В конце работа была произведена экономическая оценка выполненного проекта модернизации мехатронной системы толкателя методической печи. Внедрение модернизации позволяет увеличить эффективность установки, тем самым увеличивая дальнейшую прибыль.

Капитальные затраты составили 1252209 руб. Годовой объём производства увеличится на 1848 заготовок в год. Как следствие увеличение годовой прибыли составит 2,2 млн руб. Ежегодные затраты на оплату труда не изменяются. Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования увеличатся на 29304 руб. в год. Срок окупаемости проекта составит 7 месяцев. Эти показатели позволяют считать модернизацию мехатронной системы толкателя методической печи экономически эффективной.

Таким образом, все поставленные задачи выполнены, а цель достигнута.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Официальный сайт ПАО «ЧМК». – <http://www.mechel.ru/sector/steel/cmк/>
- 2.Устройство и принцип работы трехфазных асинхронных двигателей. – [http://ruaut.ru/content/tehnicheskaya\\_biblioteka/videoteka/Ustroistvo\\_i\\_princip\\_raboti\\_trehfaznih\\_asinhronnih\\_dvigatelay.html](http://ruaut.ru/content/tehnicheskaya_biblioteka/videoteka/Ustroistvo_i_princip_raboti_trehfaznih_asinhronnih_dvigatelay.html)
- 3.Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
4. Лукин А.Н. Преобразователи частоты для асинхронных электроприводов: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию / А.Н. Лукин, В.И. Косматов. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2005. – 49 с.
- 5.Каталог электрических двигателей маркировки АИРМ132. – [http://www.bivolt.ru/katalog/AIRM132M8\\_5,5kVt\\_750ob/min.html](http://www.bivolt.ru/katalog/AIRM132M8_5,5kVt_750ob/min.html)
- 6.Каталог преобразователей частоты марки АВВ. – <https://new.abb.com/products/64568761/acs800-01-0011-3-pcont-max7-5kw-icont-max19a>
7. Виды защит привода. – <https://www.ngpedia.ru/id35108p1.html>
- 8.Агарков А.В. Автоматизация технологических процессов в приборостроении с помощью промышленных роботов: учебное пособие / А.В. Агарков. – Москва: Изд-во МАИ, 2014. – 52 с.
9. Каталог SIMATIC S7-300. – Москва: Изд. Сименс, 2005. – 291 с.
- 10.Каталог SIEMENS. Блоки питания SITOP. – Москва: Изд. Сименс, 2011. – 11с.
- 11.Каталог оптических датчиков фирмы OMRON. – <https://industrial.omron.ru/ru/products/fiber-sensor-heads>
- 12.Поздеев А.Д. Электромеханические процессы в частотно-регулируемых электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары, 1998. – 192 с.
- 13.Фомин Н.В. Системы управления электроприводами: учебное пособие / Н.В. Фомин. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. – 350с.

14. Дядик В.Ф. Теория автоматического управления / В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Криницын – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

15. Лазарева Т.Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. – 352 с.

16. Определение экономической эффективности технических решений в дипломных проектах: методические указания / сост. Т.В. Попп. – Екатеринбург, Изд. УрГУПС, 2014. – 32 с.

17. Экономика организации: учебное пособие / Е.В. Кучина. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2017. – 52 с.

18. Производственные ресурсы машиностроительных предприятий: учебное пособие / Е.В. Кучина, Е.С. Вахитова. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2014. – 42 с.