

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»
Направление «Мехатроника и робототехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

_____ 2019 г.

Разработка мехатронной системы автоматического управления кранов-
штабелеров цеха «ЦЭТЛ» ПАО «ЧМК»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ — 15.03.06.2019.350.ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер
Преподаватель
О.А. Гасиярова

_____ 2019 г.

Руководитель работы
Доцент, к.т.н.
С.С. Воронин

_____ 2019 г.

Ст. преподаватель
С.С. Воронин

_____ 2019 г.

Автор работы
Студент группы П-456
Дмитрий Александрович Курушкин

_____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Курушкин Д.А. Разработка мехатронной системы автоматического управления кранов-штабелеров цеха «ЦЭТЛ» ПАО «ЧМК» – Челябинск: ЮУрГУ, П-456, 70 с., 20 илл., 10 табл. библиогр. список – 14 наим.

Выпускная квалификационная работа (ВКР) выполнена с целью проектирования процесса управления мехатронной системой крана-штабелера ПАО «ЧМК».

В ВКР проанализирована организационная структура предприятия, рассмотрен технологический процесс копрового цеха, проведена оценка результативности выбранного оборудования на склад копрового цеха ПАО «ЧМК».

В рамках работы разработана мехатронная система автоматического управления кранов-штабелеров, а также система подчиненного регулирования осей передвижения крана-штабелера.

С помощью компьютерного моделирования программы MATLAB (пакета Simulink) разработана структурная схема системы автоматического регулирования (САР) положения для типовых режимов работы электроприводов крана-штабелера. Сняты переходные процессы, проанализированы их показатели качества, позволяющие утверждать об успешном проектировании САР.

Рассчитаны смета капитальных вложений, фонд оплаты труда, амортизационные отчисления до и после внедрения оборудования, годовая экономия и срок окупаемости.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ	7
1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма.....	7
1.2 Характеристика и кинематические схемы проектируемого механизма	10
1.3 Требования к приводам и системе автоматизации	11
1.4 Выбор системы привода	12
1.5 Расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограмм	12
1.6 Выбор основного силового оборудования	39
1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств.....	41
2 РАЗРАБОТКА САУ	43
2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации	43
2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат	44
2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата	47
2.4 Разработка контура регулирования технологических координат	48
2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода.....	48
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ	59
3.1 Расчет сметы капитальных затрат	59
3.2 Расчет РСЭО	61
3.3 Расчет срока окупаемости проекта.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	72

ВВЕДЕНИЕ

ПАО «ЧМК» - предприятие, которое выпускает сталь высокого качества. Оно относится к немногим предприятиям, которые могут присваивать стали свой индекс. Для ПАО «ЧМК»: ЧС (Челябинская сталь).

Производство чугуна и стали непосредственно из руды – процесс дорогостоящий сравнительно с переплавкой вторичного сырья. Под эти цели ПАО ЧМК выделяет специализированные участки, именуемые копровыми цехами. Именно в них происходит подготовка металлолома к последующей переплавке.

Фактически, копровый цех служит своеобразным центром сбора металлолома или конечной его транзитной точкой, куда он поступает из различных источников.

В данной ВКР мы займемся исследованием и разработкой крана-штабелера для одного из складов копрового цеха. Необходимо обеспечить автоматизированное перемещение груза в ячейки с помощью разработанной мехатронной системы. Мехатронной системой, способной заменить в данном складе человеческий труд.

Кран-штабелер - совокупность системы приводов, работающих под управлением программируемого автоматического устройства или человека-оператора. Главная задача крана-штабелера – перемещение груза из начальной точки в нужную ячейку.

Применение крана-штабелера позволяет освободить человека от тяжёлых или ручных операций, включая и вредные работы.

После подбора и проверки оборудования необходимо разработать систему автоматического управления технологическим процессом (АСУ ТП), которая и будет осуществлять процесс работы склада без участия человека. Сложностью моделирования системы автоматического регулирования положения является высокие требования к точности позиционирования, для осуществления бесперебойной работы. Также необходимо выдержать

ограничения по скорости для каждой оси перемещения. Необходимо не только разработать архитектуру системы автоматизации, но и разработать алгоритм её работы.

Далее необходимо провести экономическую оценку уместности использования устанавливаемого оборудования, рассчитать экономическую выгоду и срок окупаемости.

Целью работы является разработка системы перемещения крана-штабелера. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Анализ технологического процесса склада копрового цеха.
- 2) Выбор основного силового оборудования для крана-штабелера.
- 3) Разработка системы автоматического управления участка.
- 4) Моделирование системы автоматического регулирования технологической координаты.
- 5) Расчет технико-экономических показателей.

1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика цеха, описание технологического процесса работы механизма

Производство чугуна и стали непосредственно из руды – процесс дорогостоящий сравнительно с переплавкой вторичного сырья. Под эти цели ПАО ЧМК выделяет специализированные участки, именуемые копровыми цехами. Именно тут происходит подготовка металлолома к последующей переплавке.

Фактически, копровый цех служит своеобразным центром сбора металлолома или конечной его транзитной точкой, куда он поступает из различных источников. Это вторичное сырье со стороны и металлические отходы собственных цехов предприятия:

- 1) Литейного.
- 2) Прессового.
- 3) Кузнечного.
- 4) Прочих.

Основная функция цеха – дробление, измельчение металлолома. Ее осуществляет одноименное оборудование копрового цеха. Также на территории находятся склады, предназначенные для хранения переработанного металла, инструментов и др.

Алгоритм работы механизма

Алгоритм работы крана-штабелера зависит от нескольких параметров. Главный из них – система защиты. В системе предусмотрены защиты как автоматизированного рабочего места (АРМ) на наличие ошибок, так и защиты самих двигателей штабелера.

Штабелер работает в 2-х режимах, выбираемых с помощью переключателя «ручной/автомат». Кроме этого, в автоматическом режиме на штабелере возможно дистанционное управление штабелером с АРМ.

В ручном режиме присутствует освещение кабины. Управление штабелером производится с помощью джойстика. В ручном режиме действуют следующие блокировки на движение штабелера:

- 1) Блокировка рук и ног (нахождение человека в кабине).
- 2) Конечные положения по движению вперед\назад, вверх\вниз, выдвижение вилки влево\вправо.
- 3) Блокировка подъема веса более 1000 кг.
- 4) Нажатие кнопки «Стоп» приводит к немедленной остановке штабелера.

В автоматическом режиме управление производится с АРМ путем выдачи задания на перемещение груза. Освещение кабины в этом режиме выключено. В автоматическом режиме действуют следующие блокировки на движение штабелера:

- 1) Конечные положения по движению вперед \ назад, вверх \ вниз, выдвижение вилки влево \ вправо.
- 2) Блокировка подъема веса более 1000 кг.
- 3) Блокировка одновременного движения механизмов по осям.
- 4) Блокировка движения вперед/назад при отсутствии исходного положения по вилке (не в среднем положении) и платформы (не внизу).
- 5) Нажатие кнопки «Стоп» приводит к немедленной остановке штабелера с отменой выполнения текущего задания (при прерванной операции при наличии груза необходимо после устранения причин нажатия кнопки «Стоп» завершить операцию в ручном режиме).

Пока защита не сработает, включен обычный режим поведения штабелера. Автоматический режим является основным режимом работы штабелера и выбирается установкой переключателя режима работы в положение «Автомат».

Последовательность работы в автоматическом режиме следующая:

1) Ввод задания с АРМ оператора путем последовательного нажатия на ячейку источника груза, ячейку приемника груза и кнопку Старт на экране АРМ;

2) Задание передается на штабелер и выполнение начинается немедленно (штабелер должен находиться в режиме «Автомат»);

3) Производится движение вперед\назад до ячейки источника груза;

4) Производится движение вверх до ячейки источника груза;

5) Производится выдвижение вилки влево\вправо в соответствии с заданием;

6) Производится подъем груза с контролем веса;

7) Производится возврат вилки в исходное положение;

8) Производится движение вниз до исходного положения;

9) Производится движение вперед\назад до ячейки приемника груза;

10) Производится движение вверх до ячейки приемника груза;

11) Производится выдвижение вилки влево\вправо в соответствии с заданием;

12) Производится опускание груза;

13) Производится возврат вилки в исходное положение;

14) Производится движение вниз до исходного положения;

15) Производится движение штабелера назад до исходного положения;

16) Цикл закончен, штабелер ожидает следующего задания.

При превышении веса, нажатии кнопки «Стоп» или других непредвиденных ситуациях при наличии груза на штабелере необходимо завершить операцию в ручном режиме. Кроме этого, на АРМ предусмотрена кнопка «Стоп», по которой прерывается текущее задание (при наличии) и штабелер возвращается в исходное положение. Для отработки подобного случая необходимо задать исходное положение крана-штабелера.

Исходное положение для штабелера следующее:

1) Вилка находится в среднем положении.

2) Платформа опущена до конечного положения вниз.

3) Штабелер выведен до конечного положения вперед (максимальное расстояние от стены/мишени).

В данном проекте разрабатывалась только автоматизированная часть крана-штабелера. Ручное управление предусматривается, но не рассчитывается.

1.2 Характеристика и кинематические схемы проектируемого механизма

Кран-штабелер способен перемещаться в трех основных направлениях движения: по горизонтальному рельсу, по вертикальной оси и выдвижение грузозахвата (вправо и влево).

Кран-штабелер имеет три механизма с электрическим приводом:

1) Механизм для перемещения по оси X. Ось X отвечает за горизонтальное перемещение крана-штабелера вдоль стеллажей. Максимальное расстояние перемещения по оси X – это расстояние от первой до последней ячейки, расположенных по длине. Данное расстояние может варьироваться. В данном проекте оно равно 56 ячейкам.

2) Механизм для перемещения по оси Y. Ось Y отвечает за вертикальное перемещение крана-штабелера. Максимальное расстояние по оси Y – это расстояние от первой до последней ячейки, расположенных по вертикали. Данное расстояние может варьироваться. В данном проекте оно равно 4 ячейкам.

3) Механизм передвижения грузозахвата. Данное передвижение считается передвижением по оси Z. Расстояние выдвижения равно расстоянию от середины грузозахвата, до середины ячейки. Оно равно 1,6 метрам.

Кинематическая схема механизма для горизонтального перемещения представлена на рисунке 1. В схеме используется двухступенчатый редуктор в сборе с электродвигателем.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема горизонтального перемещения крана-штабелера.

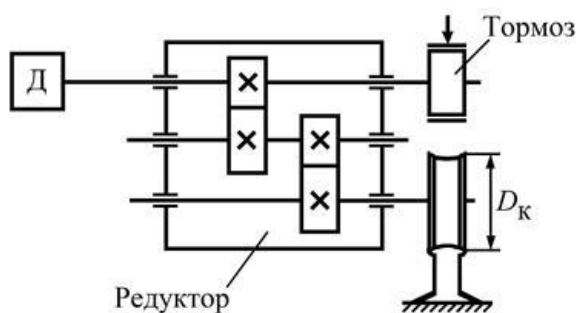


Рисунок 1 – Кинематическая схема механизма передвижения по оси X

Кинематическая схема для вертикального перемещения представлена на рисунке 2. В схеме используется планетарный двухступенчатый редуктор в сборе с электродвигателем.

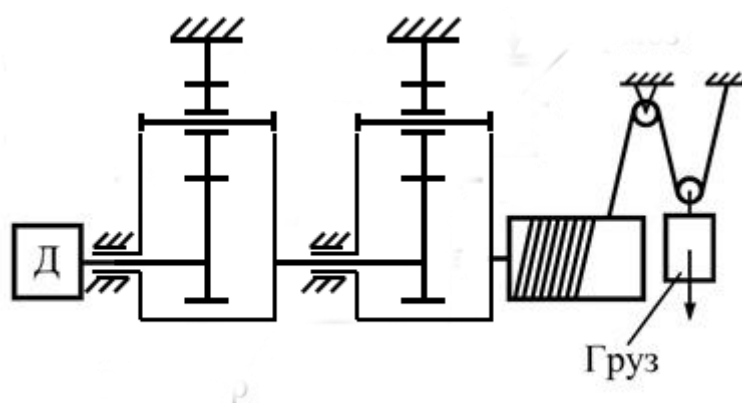


Рисунок 2 – Кинематическая схема механизма передвижения по оси Y

1.3 Требования к приводам и системе автоматизации

К основным требованиям к приводу и системе автоматизации можно отнести следующие:

- 1) Ограничение скорости при перемещении крана по X - 1,6 м/с.

- 2) Ограничение скорости при перемещении крана по $Y - 0,3$ м/с.
- 3) Ограничение скорости при перемещении крана по $Z - 0,3$ м/с.
- 4) Точность остановки в заданной позиции не менее ± 50 мм.
- 5) Быстродействие системы на уровне контроллера не более 30 мс.

1.4 Выбор системы привода

Выбор системы привода является частью общей задачи разработки и создания механизма новой конструкции.

Кран-штабелер в процессе эксплуатации подвергается нагрузке на привод в момент поднятия груза, его перемещения, торможения и разгона. Следовательно, привод должен обеспечивать стабильные показатели скорости, удержания и относительной точности позиционирования в процессе транспортировки независимо от нагрузки.

Исходя из вышеописанных требований, было принято использование асинхронных моторов. Такие электродвигатели применяются в электроприводах металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов и вентиляторов. Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их высокими надёжностью и КПД, а также возможностью регулирования скорости с помощью частотного преобразователя.

1.5 Расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограмм

В данном разделе будет произведен расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограмм для каждого двигателя крана-штабелера. Кран-штабелер перемещается в трех осях: вдоль стеллажей (ось X), вертикальное перемещение (ось Y) и перемещение грузозахвата (ось Z). Следовательно, в

данном разделе будет выбрано три двигателя для каждой оси и построены диаграммы и тахограммы для каждой из осей передвижения.

Расчет двигателя для передвижения по оси X

Нагрузка, приложенная на ходовое колесо находится по формуле (1):

$$P = \frac{(G_{кр} + Q) \cdot g}{2} \quad (1)$$

После подстановки численных значений в формулу (1) получается:

$$P = \frac{(3000 + 1000) \cdot 9,81}{2} = 19620 \text{ Н}$$

Выбирается диаметр колеса $D_k = 25$ см (см. [2], табл. V.2.47, с. 319); ширина плоского рельса В0 (ГОСТ 4693–77).

При работе крана его ходовые колеса нагружены весом крана и груза. Эти нагрузки действуют в радиальном направлении и вызывают контактные напряжения. В зависимости от типа поверхности катания колеса и рельса различают линейный и точечный контакты. В данном случае рассматривается линейный контакт.

Проверяется колесо на контактные напряжения в ободу при линейном контакте:

$$\sigma = \alpha_1 \cdot \sqrt{\frac{k_r \cdot p}{b \cdot \frac{D_k}{2} \cdot 10}} \leq [\sigma_{ном}] \quad (2)$$

где $\alpha_1 = 60$ при стальном колесе (см. [2], с. 319);

b – длина линии контакта, см;

k_T – коэффициент толчков (см. [1], п. I.8, с. 69), $k_T = 1,2$;

$[\sigma_{ном}]$ – допускаемое контактное напряжение, МПа (см. [2], табл. V.2.46, с. 318). Для Сталь 45 (ГОСТ 1050–74) $[\sigma_{ном}] = 450$ МПа.

Подставляя числовые значения в формулу (2) получается:

$$\sigma = 60 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 19620}{5 \cdot \frac{25}{2} \cdot 10}} = 368 \leq 450 \text{ МПа}$$

Далее следует выполнить расчет горизонтальных роликов. Схема горизонтальных роликов представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема для расчета горизонтальных роликов

Горизонтальная нагрузка на опоры находится по формуле (3).

$$N = \frac{Q \cdot g \cdot l}{h} \quad (3)$$

где $l = 1,2$ м;

$h = 8$ м.

Подставляя значения в формулу (3) можно рассчитать горизонтальную нагрузку с грузом и без.

С грузом:

$$N = \frac{1050 \cdot 9,81 \cdot 1,2}{8} = 1545 \text{ Н}$$

Без груза:

$$N = \frac{50 \cdot 9,81 \cdot 1,2}{8} = 73,5 \text{ Н}$$

Диаметр роликов принимается равным 100 мм. Длина линии контакта $b = B = 4 \text{ см}$.

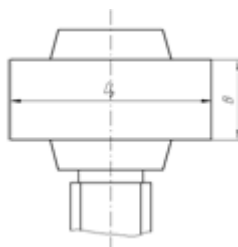


Рисунок 4 – Чертеж ролика

Сила, действующая на один ролик, находится по формуле (4):

$$N_p = \frac{N}{2} = \frac{1545}{2} = 772,5 \text{ Н} \quad (4)$$

Необходимо выполнить проверку горизонтального ролика на контактные напряжения в обode при линейном контакте.

$$\sigma = \alpha_1 \cdot \sqrt{\frac{k_T \cdot N_p}{b \cdot \frac{D_p}{2} \cdot 10}}, \quad (5)$$

$$\sigma = 60 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 772,5}{4 \cdot \frac{10}{2} \cdot 10}} = 129 \leq 450 \text{ МПа}$$

Статическое сопротивление передвижению W_c состоит из сопротивления от трения в ходовых частях на прямолинейном пути $W_{тр}$, от уклона пути $W_{ук}$ на угол β :

$$W_c = W_{тр} + W_{ук}, \quad (6)$$

Сопротивление от трения в ходовых частях на прямолинейном участке пути, считая $\cos\beta = 1$, находится по формуле (7).

$$W_{тр} = (G_{кр} + Q) \cdot g \cdot \frac{\mu_{ц} \cdot d_{ц} + 2 \cdot f}{D_k} \cdot k_p, \quad (7)$$

где $G_{кр}$ - масса крана;

Q - масса груза с грузозахватом;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$;

$D_k, D_1, d_{ц}$ и $d_{ц1}$ - диаметры нижних и верхних колес и их цапф;

$\mu_{ц}$ - коэффициент трения подшипников, приведенный к цапфе колеса;

f - коэффициент трения качения, мм;

N - горизонтальная нагрузка на опоры;

k_p - коэффициент, учитывающий трение реборд и ступиц колес.

Далее находится $W_{тр}$ по формуле (7), принимая $f = 0,3$ мм (см. [2], табл. VI.3.2, с. 421), $\mu_{ц} = 0,015$ (см. [2], табл. V.1.69, с. 237), $k_p = 1,1$ (см. [2], табл. VI.3.3, с. 422):

Максимальное сопротивление передвижению груженого крана ($k_p = 1,1$):

$$W_{тр} = (3000 + 1000) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,015 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{250} \cdot 1,1 + \frac{0,05 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{100} \cdot 1,1 = 238 \text{ Н}$$

Минимальное сопротивление передвижению груженого крана ($k_p = 1$):

$$W_{тр} = (3000 + 1000) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,015 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{250} \cdot 1,1 + \frac{0,05 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{100} = 217 \text{ Н}$$

Максимальное сопротивление передвижению порожнего крана ($k_p = 1,1$):

$$W_{тр} = (3000 + 50) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,015 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{250} \cdot 1,1 + 73,5 \cdot \frac{0,05 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{100} = 181 \text{ Н}$$

Минимальное сопротивление передвижению порожнего крана ($k_p = 1$):

$$W_{тр} = (3000 + 50) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,015 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{250} + \frac{0,05 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{100} = 164 \text{ Н}$$

Сопротивление движению от уклона пути находится по формуле (8):

$$W_{ук} = (G_{кр} + Q) \cdot g \cdot i, \quad (8)$$

где i – уклон пути. Принимается равным – 0,003.

Таким образом, подставляя численные значения в формулу (8), рассчитывается сопротивление движению от уклона пути для груженого и порожнего кранов.

Груженный кран:

$$W_{\text{ук}} = (3000 + 1000) \cdot 9,81 \cdot 0,003 = 118 \text{ Н}$$

Порожний кран:

$$W_{\text{ук}} = 3000 \cdot 9,81 \cdot 0,003 = 88 \text{ Н}$$

Подставляя в формулу (6) полученные значения, получается:

$$W_c = 238 + 118 = 356 \text{ Н}$$

Статическая мощность двигателя N_c (кВт), при установившемся движении рассчитывается по формуле (9):

$$N_c = \frac{W_c \cdot V}{1000 \cdot \eta}, \quad (9)$$

где V – номинальная скорость движения крана, м/с;

η – общий КПД механизма передвижения; $\eta = 0,7..0,85$.

Принимая $\eta = 0,7$, по формуле (10) рассчитывается статическая мощность двигателя:

$$N_c = \frac{356 \cdot 1,6}{1000 \cdot 0,85} = 1,5 \text{ кВт} \quad (10)$$

Номинальная частота оборотов колеса рассчитывается по формуле (11):

$$n_k = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D_k}, \quad (11)$$

Подставляя численные значения в формулу (11) получается:

$$n_k = \frac{60 \cdot 1,6}{3,14 \cdot 0,25} = 122 \text{ об/мин}$$

Требуемый вращающий момент на тихоходном валу редуктора находится по формуле (12):

$$M_p = \frac{W_c \cdot D_k}{2 \cdot \eta_k} = \frac{356 \cdot 0,25}{2 \cdot 0,97} = 46 \text{ Нм}, \quad (12)$$

где $\eta_k = 0,97$ - принятое КПД механизма передачи момента от колеса к редуктору.

Тормозной момент на валу двигателя рассчитывается по формуле (13):

$$M_T = (W_{ук} - W_{гр}^{min}) \cdot \frac{D_k \cdot \eta}{2 \cdot u} + \frac{\eta_{дв}}{9,55 \cdot t_T} \cdot \left(1,2 \cdot J_p + \frac{(Q + G_{кр}) \cdot D_k^2 \cdot \eta}{4 \cdot u^2} \right), \quad (13)$$

где t_T - время торможения.

Принимая время торможения равным 4 с ($t_T = 4$) и подставляя численные значения в формулу (13) находится тормозной момент на валу двигателя.

$$M_T = (118 - 217) \cdot \frac{0,25 \cdot 0,84}{2 \cdot 12} + \frac{1390}{9,55 \cdot 4} \cdot (1,2 \cdot 0,0021 + \frac{(3000 + 1000) \cdot 0,25^2 \cdot 0,85}{4 \cdot 12^2}) = 12,35 \text{ Нм}$$

По результатам расчета параметров двигателя и тормоза выбирается мотор-редуктор производства немецкой фирмы Bauer BK30 с двигателем D09LA4 и встроенным тормозом постоянного тока, питающегося от встроенного выпрямителя Z008B. Параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры мотор-редуктора D09LA4

Тип двигателя	D09LA4
Мощность на валу $N_{\text{дв.пер.}}$, кВт	1.5
Частота вращения вала $n_{\text{дв.пер.}}$, об/мин	1390
Максимальный момент M , Н м	111
Момент инерции $J_{\text{дв.пер.}}$, кг м ²	0.321

Далее будет необходимо найти время разгона и торможения грузовой и порожней крана. После будут рассчитаны коэффициенты запаса по сцеплению для этих состояний.

Средний пусковой момент двигателя, посредством системы управления находится по формуле (14):

$$M_{\text{cp}} = \frac{9550 \cdot N_{\text{дв}}}{n_{\text{дв}}} \cdot \psi \quad (14)$$

Подставляя численные значения в формулу (14):

$$M_{cp} = \frac{9550 \cdot 1,5}{1390} \cdot 2,6 = 60 \text{ Нм}$$

Время разгона и торможения грузевого крана определяется по формуле:

$$t_p = \frac{n_{дв} \cdot [1,2 \cdot (J_p + J_M) + \frac{(Q + G_{кр}) \cdot D_k^2}{4 \cdot u^2 \cdot \eta}]}{9,55 \cdot (M_{cp} - \frac{W_c \cdot D_k}{2 \cdot u \cdot \eta})}, \quad (15)$$

Подставляя численные значения в формулу (15) рассчитывается время разгона и торможения грузевого крана.

$$t_p = \frac{1390 \cdot [1,2 \cdot (0,321 + 0,0024) + \frac{(1000 + 3000) \cdot 0,25^2}{4 \cdot 12^2 \cdot 0,9}]}{9,55 \cdot (26,6 - \frac{370 \cdot 0,25}{2 \cdot 12 \cdot 0,9})} = 7 \text{ с}$$

Время разгона и торможения порожнего крана определяется по формуле:

$$t_p = \frac{n_{дв} \cdot [1,2 \cdot (J_p + J_M) + \frac{G_{кр} \cdot D_k^2}{4 \cdot u^2 \cdot \eta}]}{9,55 \cdot (M_{cp} - \frac{W_c \cdot D_k}{2 \cdot u \cdot \eta})}, \quad (16)$$

$$t_p = \frac{1390 \cdot [1,2 \cdot (0,0028 + 0,0023) + \frac{3000 \cdot 0,25^2}{4 \cdot 12^2 \cdot 0,9}]}{9,55 \cdot (26,6 - \frac{370 \cdot 0,25}{2 \cdot 12 \cdot 0,9})} = 6 \text{ с}$$

Теперь, для всех 4-х случаев сравним силы сопротивления движению, включая силы инерции с силами сцепления колес с поверхностью катания:

$$\omega = \frac{2 \cdot 0,3 + 0,015 \cdot 50}{250} = 0,0054,$$

Сила сцепления приводных колес с поверхностью катания грузевого крана находится по формуле (17).

$$F_{\text{сцп}} = \frac{Q + G_{\text{кр}}}{2} \cdot g \cdot (\varphi + \omega), \quad (17)$$

где $\varphi = 0,2$ – коэффициент сцепления для кранов работающих в закрытом помещении [2, стр. 425].

Подставляя численные значения в формулу (17) рассчитывается сила сцепления приводных колес с поверхностью катания грузевого крана.

$$F_{\text{сцп}} = \frac{3000 + 1000}{2} \cdot 9,81 \cdot (0,2 + 0,0054) = 4025 \text{ Н}$$

Сила сцепления приводных колес с поверхностью катания порожнего крана находится по формуле (18):

$$F_{\text{сцп}} = \frac{G_{\text{кр}}}{2} \cdot g \cdot (\varphi - \omega), \quad (18)$$

где $\varphi = 0,2$ – коэффициент сцепления для кранов работающих в закрытом помещении [2, стр. 425].

Подставляя численные значения в формулу (18) рассчитывается сила сцепления приводных колес с поверхностью катания порожнего крана.

$$F_{\text{сцп}} = \frac{3000}{2} \cdot 9,81 \cdot (0,2 - 0,0054) = 2860 \text{ Н}$$

При разгоне груженого крана коэффициент запаса по сцеплению находится по формуле (19):

$$k_{\text{зг}} = \frac{F_{\text{сцп}}}{(Q + G_{\text{кр}}) \cdot \frac{V_L}{t_{\text{пр}}} + W_{\text{тр}}^{\text{max}} + W_{\text{ук}}}, \quad (19)$$

Подставляя численные значения в формулу (19) рассчитывается коэффициент запаса по сцеплению при разгоне груженого крана.

$$k_{\text{зг}} = \frac{4025}{(1000 + 3000) \cdot \frac{1,6}{7} + 252 + 118} = 1,7$$

При разгоне порожнего крана коэффициент запаса по сцеплению находится по формуле (20):

$$k_{\text{зп}} = \frac{F_{\text{сцп}}}{G_{\text{кр}} \cdot \frac{V_L}{t_{\text{пр}}} + W_{\text{тр}}^{\text{max}} + W_{\text{ук}}}, \quad (20)$$

Подставляя численные значения в формулу (20) рассчитывается коэффициент запаса по сцеплению при разгоне порожнего крана.

$$k_{\text{зп}} = \frac{2860}{3000 \cdot \frac{1,6}{6} + 178 + 88} = 1,2$$

При торможении груженого крана коэффициент запаса по сцеплению находится по формуле (21):

$$k_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{сщг}}}{(G_{\text{кр}} + Q) \cdot \frac{V_L}{t_{\text{тр}}} + W_{\text{тр}}^{\text{min}} + W_{\text{ук}}}, \quad (21)$$

Подставляя численные значения в формулу (21) рассчитывается коэффициент запаса по сцеплению при торможении груженого крана.

$$k_{\text{тр}} = \frac{4025}{(3000 + 1000) \cdot \frac{1,6}{7} + 229 + 118} = 1,45$$

При торможении порожнего крана коэффициент запаса по сцеплению находится по формуле (22):

$$k_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{сщг}}}{G_{\text{кр}} \cdot \frac{V_L}{t_{\text{тр}}} - W_{\text{тр}}^{\text{min}} + W_{\text{ук}}}, \quad (22)$$

Подставляя численные значения в формулу (22) рассчитывается коэффициент запаса по сцеплению при торможении порожнего крана.

$$k_{\text{тп}} = \frac{2860}{3000 \cdot \frac{1,6}{6} - 168 + 88} = 1,05,$$

Результаты расчетов в данном пункте сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения времени и коэффициента запаса

		Время, с	Коэффициент запаса по сцеплению
Груженный кран	разгон	7	1.7
	торможение	7	1.45
Порожний кран	разгон	6	1.2
	торможение	6	1.05

Угловую частоту вращения двигателя можно найти по формуле (23):

$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (23)$$

где n – номинальная частота вращения двигателя.

Подставляя численные значения в формулу (23) рассчитывается угловая частота вращения двигателя.

$$\omega_3 = \frac{3,14 \cdot 1390}{30} = 145,5 \text{ рад/с}$$

Угловая скорость мотор-редуктора рассчитывается по формуле (24):

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{V \cdot i}{R_{\text{хк}}}, \quad (24)$$

Подставляя численные значения в формулу (24) рассчитывается угловая скорость двигателя под нагрузкой:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{1,6 \cdot 64,08}{0,12} = 854,4 \text{ рад/с}$$

Без нагрузки:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{1,2 \cdot 64,08}{0,12} = 640,8 \text{ рад/с}$$

Для построения нагрузочной диаграммы, необходимо рассчитать номинальный и статический моменты.

Номинальный момент рассчитывается по формуле (25):

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 9550}{n_{\text{н}}}, \quad (25)$$

Подставляя численные значения в формулу (25) рассчитывается номинальный момент.

$$M_n = \frac{1500 \cdot 9550}{1390} = 70 \text{ Нм}$$

Для определения статического момента, необходимо найти точный КПД. КПД привода определяется из всех элементов, включая редуктор. В данном случае КПД будет рассчитываться по формуле (26):

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_m, \quad (26)$$

Подставляя численные значения в формулу (26) рассчитывается КПД:

$$\eta = 0,85 \cdot 0,96 = 0,81$$

Диаметр ходового колеса тележки $D_{\text{хк}} = 240$ мм. Согласно справочнику [6] были выбраны необходимые для дальнейших расчетов параметры, представленные в таблице 3 [5].

Таблица 3 – Основные параметры крана

$D_{\text{хк}}$, мм	$d_{\text{ш}}$, мм	μ	k_p	f
240	50	0,005	2	0,0015

Сначала необходимо найти сопротивление качению.

Тогда силу сопротивления качению можно найти по формуле (27):

$$F_{\text{ск}} = \frac{k_p \cdot P_T \cdot (f + \mu \cdot r_{\text{ш}})}{R_k}, \quad (27)$$

где f – коэффициент трения качения;

$r_{\text{ш}}$ – радиус шейки ходового колеса;

μ – коэффициент трения скольжения в подшипниках;

k_p – коэффициент трения реборд;

R_k – радиус ходового колеса.

Подставляя численные значения в формулу (27) рассчитывается сила сопротивления качению для груженого крана:

$$F_{\text{ск гр}} = \frac{2 \cdot 19937 \cdot (0,0015 + 0,005 \cdot 0,025)}{0,12} = 5399,6 \text{ Н}$$

Для порожнего крана:

$$F_{\text{ск гр}} = \frac{2 \cdot 1577 \cdot (0,0015 + 0,005 \cdot 0,025)}{0,12} = 418,9 \text{ Н}$$

Статический момент рассчитывается по формуле (28):

$$M_c = \frac{F_{\text{ск}} \cdot V}{\omega_{\text{дв}}}, \quad (28)$$

Подставляя численные значения в формулу (28) рассчитывается статический момент без нагрузки:

$$M_c = \frac{418,9 \cdot 1,6}{640,8} = 4,8 \text{ Нм}$$

С нагрузкой:

$$M_{c \text{ гр}} = \frac{5399,6 \cdot 1,2}{854,4} = 20,2 \text{ Нм}$$

Угловое ускорение рассчитывается по формуле (29):

$$\varepsilon_n = \frac{a \cdot i}{R_{\text{хк}}}, \quad (29)$$

Подставляя численные значения в формулу (29) рассчитывается ускорение без нагрузки:

$$\varepsilon_n = \frac{0,15 \cdot 64,08}{0,12} = 80,1 \text{ с}^{-2}$$

Ускорение с нагрузкой:

$$\varepsilon_n = \frac{0,1 \cdot 64,08}{0,12} = 53,4 \text{ с}^{-2}$$

Момент инерции системы определяется по формуле (30):

$$J_c = J_{дв} + \frac{m \cdot V^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (30)$$

где $J_{дв} = 0,0021 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции двигателя.

Подставляя численные значения в формулу (30) рассчитывается момент инерции порожнего крана:

$$J_c = 0,0021 + \frac{3000 \cdot 1,6^2}{640,4^2} = 0,32 \text{ кг м}^2$$

Груженого крана:

$$J_c = 0,0021 + \frac{4000 \cdot 1,2^2}{854,4^2} = 0,345 \text{ кг м}^2$$

Динамический момент рассчитывается по формуле (31):

$$M_d = J \cdot \varepsilon, \quad (31)$$

Подставляя численные значения в формулу (31) рассчитывается динамический момент без нагрузки:

$$M_d = 0,345 \cdot 205,1 = 70,8 \text{ Нм}$$

С нагрузкой:

$$M_d = 0,09 \cdot 53,4 = 4,8 \text{ Нм}$$

Уравнение движения привода одномассовой системы:

$$M = M_c \pm J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad (32)$$

При этом знак уравнения зависит от направления передачи механической мощности.

Для построения нагрузочной диаграммы необходимо рассчитать момент для всех участков движения, а именно:

1. На участке разгона с грузом.
2. На участке с установившейся скоростью с грузом.
3. На участке при торможении с грузом.

$$M = 50 + 20 = 70 \text{ Нм}$$

$$M = M_c = 20 \text{ Нм}$$

$$M_d = 30 - 70 = -40 \text{ Нм}$$

Основываясь на полученных данных, были составлены нагрузочная диаграмма и тахограмма перемещения крана, представленные на рисунке 5.

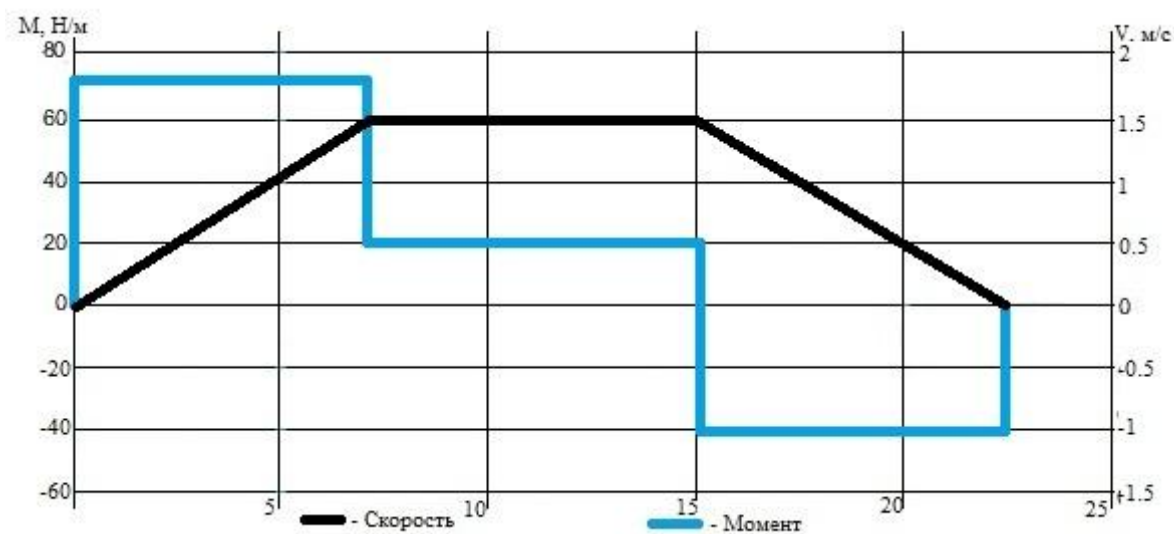


Рисунок 5 – Упрощенные нагрузочная диаграмма и тахограмма

В данном пункте был рассчитан двигатель для передвижения по оси X, рассчитаны и построены нагрузочная диаграмма и тахограмма.

Расчет двигателя для передвижения по оси Y

Горизонтальная нагрузка на ролики находится по формуле (33):

$$N_1 = \frac{G_{\text{гр}} \cdot g \cdot l_1}{h}, \quad (33)$$

где $G_{\text{гр}}$ – масса груза;

$$l_1 = 0,6 \text{ м};$$

$$h = 0,8 \text{ м}.$$

Сопротивление при подъеме находится по формуле (34):

$$W_{\text{трп}} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\mu_{\text{цп}} \cdot d_{\text{цп}} + 2 \cdot f}{D_p}, \quad (34)$$

где D_p – диаметр ролика;

$d_{\text{цп}}$ – диаметр цапфы ролика;

$\mu_{\text{цп}}$ – коэффициент трения подшипников, приведенный к цапфе ролика;

f – коэффициент трения качения.

Подставляя численные значения в формулы (33) и (34) получается:

$$N_1 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,6}{0,8} = 7357,5 \text{ Н}$$

$$W_{\text{трп}} = 2 \cdot 7357,5 \cdot \frac{0,02 \cdot 50 + 2 \cdot 0,3}{100} = 103 \text{ Н}$$

Тяговым элементом в механизме подъема является приводная цепь типа ПР. Подбор цепи производят по запасу прочности n относительно разрушающей нагрузки S_p по формуле (35):

$$S_p \geq S_{\text{max}} \cdot n, \quad (35)$$

где S_{max} – максимальное рабочее натяжение цепи конвейера

n – запас прочности;

S_p – разрушающая нагрузка.

Максимальное рабочее натяжение цепи находится по формуле (36):

$$S_{\max} = 1,2 \cdot [S_0 + (Q + G_{\text{кр}}) \cdot g], \quad (36)$$

где $S_0 = 500 \text{ Н}$ – минимальное натяжение цепи;

$G_{\text{к}}$ - масса каретки.

Подставляя численные значения в формулы (35) и (36) получается:

$$S_{\max} = 1,2 \cdot [500 + (1000 + 3000) \cdot 9,81] = 12960,6 \text{ Н}$$

$$S_p \geq 12960,6 \cdot 10 = 129606 = 130 \text{ кН}$$

Статическая мощность двигателя N_c , кВт, при установившемся движении находится по формуле (37):

$$N_c = \frac{P_{\text{окр}} \cdot V_{\text{п}}}{1000 \cdot \eta}, \quad (37)$$

где $V_{\text{п}}$ – номинальная скорость подъема грузозахвата, м/с;

η – общий КПД механизма подъема ($\eta = 0,85$);

Подставляя численные значения в формулу (37), рассчитывается статическая мощность двигателя при установившемся движении:

$$N_c = \frac{11338 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,85} = 4 \text{ кВт}$$

Выбирается двигатель трехфазный асинхронный короткозамкнутый серии 4А исполнения 1М 1081 (см. [4], табл. III.3.1, с. 300):

Таблица 4 – Характеристики 4А100L4У3

Тип	4А100L4У3
Номинальная мощность N_n , кВт	4
Номинальная частота вращения $n_{дв}$, об/мин	1430
Момент инерции ротора J_p , кг м ²	1,12

Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы был выполнен аналогично, как и в случае двигателя для оси X. Полученная диаграмма и тахограмма представлена на рисунке 6

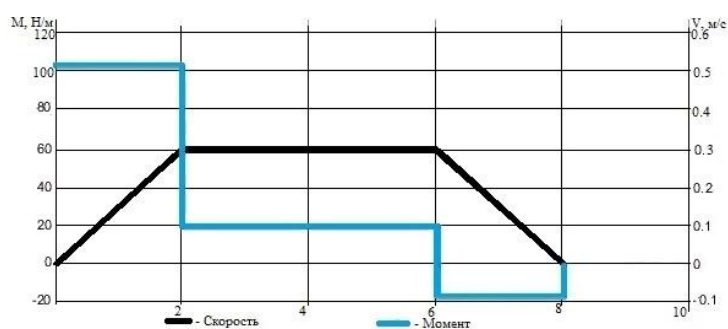


Рисунок 6 – Упрощенные диаграмма и тахограмма для передвижения по оси Y

В данном пункте был рассчитан двигатель для передвижения по оси Y, рассчитаны и построены нагрузочная диаграмма и тахограмма.

Расчет двигателя для передвижения по оси Z

Сначала необходимо найти сопротивление передвижению верхней платформы грузозахвата.

Сопротивление передвижению верхней платформы грузозахвата находится по формуле (38):

$$W_1 = G_{\text{sum}} \cdot g \cdot \omega, \quad (38)$$

где G_{sum} – масса груза с кареткой, кг;

ω - коэффициент, учитывающий сопротивление колес.

Масса груза с кареткой находится по формуле (39):

$$G_{\text{sum}} = G_{\text{rp}} \cdot 1,05, \quad (39)$$

Коэффициент, учитывающий сопротивление колес находится по формуле:

$$\omega = \frac{\mu_{\text{ц}} \cdot d_{\text{ц}} + 2 \cdot f}{D_{\text{k}}}, \quad (40)$$

Подставляя численные значения в формулы (38), (39) и (40) рассчитывается сопротивление передвижению верхней платформы грузозахвата.

$$G_{\text{sum}} = 1000 \cdot 1,05 = 1050 \text{ кг}$$

$$\omega = \frac{0,01 \cdot 25 + 2 \cdot 0,3}{50} = 0,017$$

$$W_1=1050 \cdot 9,81 \cdot 0,017 = 175 \text{ Н}$$

Суммарное сопротивление каретки находится по формуле (41):

$$W_{\text{sum}} = 1,2 \cdot (2 \cdot W_1), \quad (41)$$

Подставляя численные значения в формулу (42) рассчитывается суммарное сопротивление грузозахвата.

$$W_{\text{sum}} = 1,2 \cdot (2 \cdot 175) = 420 \text{ Н}$$

Тяговым элементом в механизме выдвижения грузозахвата является пластинчатая цепь. Подбор цепи производят по запасу прочности n относительно разрушающей нагрузки S_p . Максимальная нагрузка рассчитывается по формуле (43):

$$S_{\text{max}} = 1,2 \cdot (S_0 + W_{\text{sum}}), \quad (43)$$

Подставляя численные значения в формулу (43) рассчитывается максимальная нагрузка.

$$S_{\text{max}} = 1,2 \cdot (100 + 420) = 624 \text{ Н}$$

$$S_p \geq 624 \cdot 5 = 3120 = 3,12 \text{ кН}$$

Статическая мощность двигателя $N_{\text{дв}}$ (кВт), при установившемся движении, рассчитывается по формуле (44):

$$N_{\text{дв}} = \frac{W \cdot V_k}{1000 \cdot \eta}, \quad (44)$$

где V_k – номинальная скорость выдвигания грузозахвата, м/с;

η – общий КПД механизма выдвигания ($\eta = 0,8$).

Подставляя численные значения в формулу (44) рассчитывается статическая мощность двигателя, при установившемся движении.

$$N_{\text{дв}} = \frac{420 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,8} = 0,1 \text{ кВт}$$

На основе вычислений выбирается двигатель трехфазный асинхронный короткозамкнутый серии 4А исполнения 1М 1081 (см. [4], табл. III.3.1, с. 300).

Таблица 5 – характеристики двигателя 4ААМ56А4ЕЭ

Тип	4ААМ56А4ЕЭ
Номинальная мощность $N_{\text{дв}}$, кВт	0,12
Номинальная частота вращения $n_{\text{дв}}$, об/мин	1380
Момент инерции ротора J_p , кг·м ²	$2,87 \cdot 10^{-5}$

Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы был выполнен аналогично, как и в случае двигателей для оси X и Y.

Полученные диаграмма и тахограмма представлена на рисунке 7.

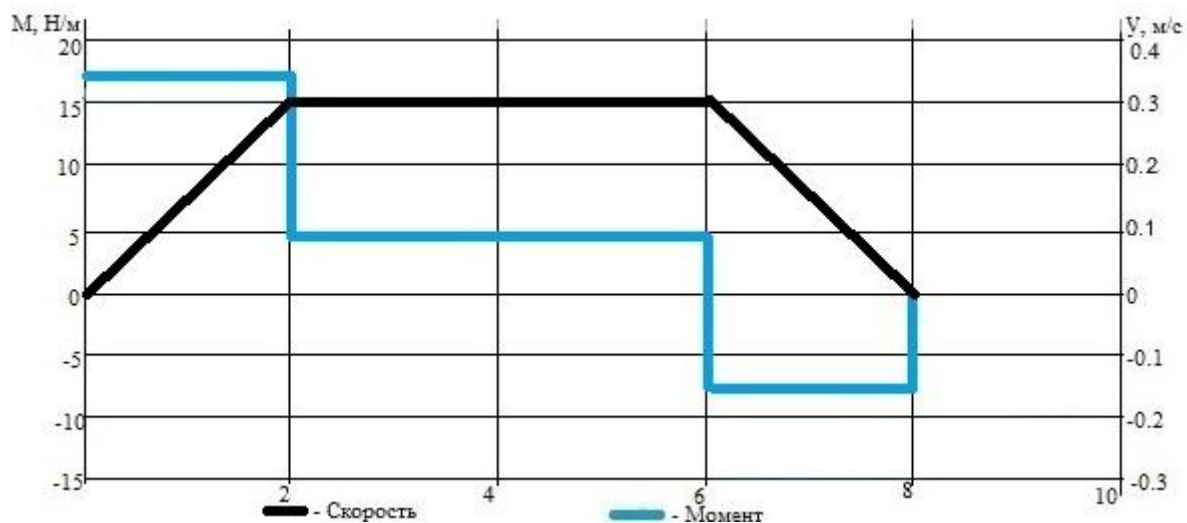


Рисунок 7 – Упрощенные диаграмма и тахограмма для передвижения по оси Z

В данном пункте был рассчитан двигатель для передвижения по оси Z, рассчитаны и построены нагрузочная диаграмма и тахограмма.

1.6 Выбор основного силового оборудования

Частотный преобразователь, или преобразователь частоты (ПЧ) - электротехническое устройство (система управления), используемое для контроля скорости и/или момента двигателей переменного тока путем изменения частоты и напряжения питания электродвигателя [10].

Правильный выбор преобразователя частоты позволит сократить текущие производственные расходы и, одновременно, повысить производительность технологического оборудования.

Важнейшим параметром электропривода является его мощность. Именно поэтому перед тем, как выбрать частотный преобразователь для электродвигателя, следует определиться с нагрузочной способностью оборудования. Мощностные показатели ПЧ должны соответствовать

значению номинальной мощности двигателя. При этом нагрузка на валу не должна подвергаться динамическим изменениям.

Фактический выбор преобразователя осуществляется исходя из условий:

$$U_{пч} \geq U_n, \quad (45)$$

$$I_{пч} \geq I_n, \quad (46)$$

$$P_{пч} \geq K_3 \cdot P_n, \quad (47)$$

Исходя из вышеописанных условий, был выбран преобразователь частоты Schneider Electric серии Altivar 71, технические характеристики которого приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики преобразователя частоты

Мощность, кВт	5,5
Номинальный выходной ток, А	20,4
Номинальный входной ток, А	13,2
Типоразмер	FSC
Встроенный коммуникационный интерфейс	ProfiNET
Питающее напряжение, В	380 ... 500 ±10%
Рабочая температура, °С	-10...+55
Степень защиты	IP65

В состав силовой схемы преобразователя частоты (рисунок 8) входят:

- 1) Автоматический выключатель.

- 2) Сетевой фильтр.
- 3) Автономный выпрямитель напряжения (АВН).
- 4) Автономный инвертор напряжения (АИН).
- 5) Блок торможения.
- 6) Синус фильтр.
- 7) Силовой фильтр.

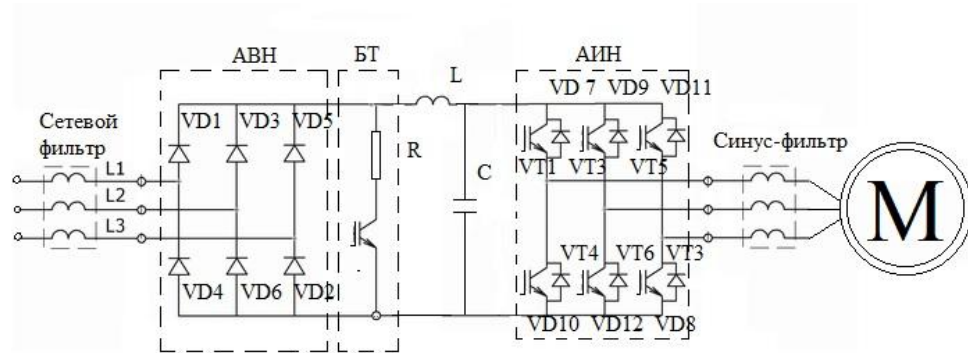


Рисунок 8 – Упрощенная схема силового модуля преобразователя частоты

1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств

Автоматический выключатель (QF) предназначен для подведения тока в нормальном режиме и его отключение при перегрузках и коротких замыканиях (КЗ) для защиты электрических цепей при снижении напряжения до недопустимой величины [13].

Условие выбора автоматического выключателя имеет вид:

$$U_{QFн} = U_n, \quad (48)$$

$$I_{QFн} \geq I_n, \quad (49)$$

Исходя из этих условий, был выбран автоматический выключатель 5SY63327 фирмы SIEMENS, технические характеристики которого представлены в таблице 7.

Таблица 7– Параметры автоматического выключателя

Тип	5SY63327
Номинальный ток, А	32
Номинальная отключающая способность, кА	6
Вес, кг	0,469

Защита двигателя от перегрузки осуществляется при помощи термодатчика, расположенного внутри электродвигателя. Обычно это просто резистор, зависимость электрического сопротивления которого от температуры доподлинно известна.

Сетевой дроссель (фильтр) применяется для того, чтобы оградить привод от сетевых помех и искажений. Его ставят на вход ПЧ также для увеличения коэффициента мощности и компенсации прерывистых токов.

Силовые фильтры высших гармоник служат для компенсации реактивной мощности и уменьшения искажений кривой питающего напряжения [14].

2 РАЗРАБОТКА САУ

2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации

На рисунке 9 представлена структура архитектуры системы автоматизации крана-штабелера.

Низший (полевой) уровень включает в себя датчики и исполнительные устройства, относящиеся к объекту управления. Движение крана-штабелера, а также его скорость обеспечиваются асинхронным двигателем D09LA4.

Для поддержания скорости и положения, сигнал с лазерного дальномера DIMETIX FLS/DLS передается на модуль удаленного ввода/вывода по ASCII-интерфейсу. Модуль ввода/вывода соединен с программируемым логическим контроллером (ПЛК) CPU S7-1200, который управляет частотным преобразователем Schneider Electric серии Altivar 71, регулирующим скорость двигателя.

Второй уровень состоит из программируемого логического контроллера. Осуществляет автоматическое управление с помощью информации, полученной с датчиков.

Третий уровень состоит из рабочей станции - компьютера автоматизированным рабочим местом (АРМ). Диспетчер осуществляет наблюдение за ходом технологического процесса или управление им с помощью мнемосхемы на экране монитора компьютера по сети Ethernet.

Также присутствует так называемый четвертый уровень, в который входит сервер 1С. Сервер подключается по сети ethernet и служит для структуризации и хранения информации о содержимом ячеек склада. Также непосредственно с сервера 1С можно передавать задания на перемещение груза на АРМ.

На рисунке 9 представлена структурная схема АСУ склада.

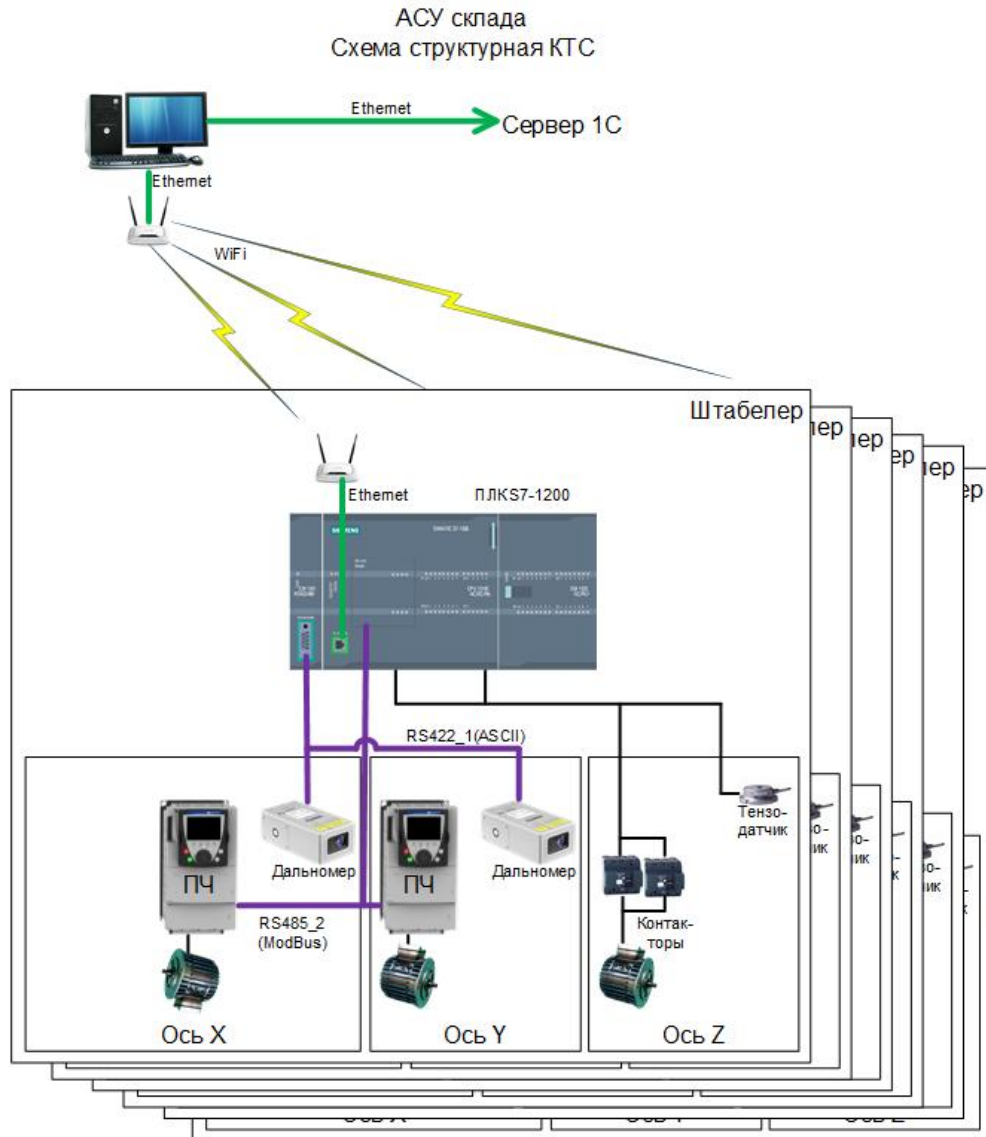


Рисунок 9 – Структура АСУ ТП

2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

Контроллер (ПЛК) – это микропроцессорное устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки, хранения информации и создания команд управления.

Для реализации автоматической системы управления помимо самого контроллера необходимо дополнительное оборудование, такое как модули ввода-вывода, датчики и станции сбора данных.

Выбор микроконтроллера происходит, основываясь на технологическом процессе, а также требованиях к системе управления. А именно:

- 1) Быстродействие системы на уровне контроллера не более 30 мс.
- 2) Бесконтактная система управления электроприводом.
- 3) Встроенный интерфейс типа PROFIBUS или PROFINET.

Учитывая вышеописанные особенности, был выбран контроллер фирмы SIEMENS SIMATIC S7-1200, представленный на рисунке 10.



Рисунок 10 – ПЛК SIMATIC S7-1200

Контроллер взаимодействует с автоматизированной системой Scada. Контроллер принимает сигналы с лазерных датчиков о положении крана-штабелера и управляет исполнительными механизмами для перемещения по транспортной линии. Параметры контроллера приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики контроллера

Характеристика	CPU 1214C
Физический размер (мм)	110x100x75
Локальные встроенные входы/выхода:	
• Цифровые	14входов/10выходов
• Аналоговые	2 входа

Продолжение страницы 8.

Величина образа процесса	1024 байта входов и 1024 байта выходов
Битовая память (М)	8192 байта
Дополнительные сигнальные модули	8

В контроллере имеются 4 интерфейсных модуля: ethernet, встроенный непосредственно в сам контроллер; интерфейсный модуль CM1241 RS422/485; интерфейсный модуль CB1241 RS485; модуль входов/выходов SM1223 DC RLY.

В данном проекте есть необходимость использование лазерного дальномера, для получения информации о местоположении крана-штабелера.

Был выбран лазерный дальномер Dimetix Dls.

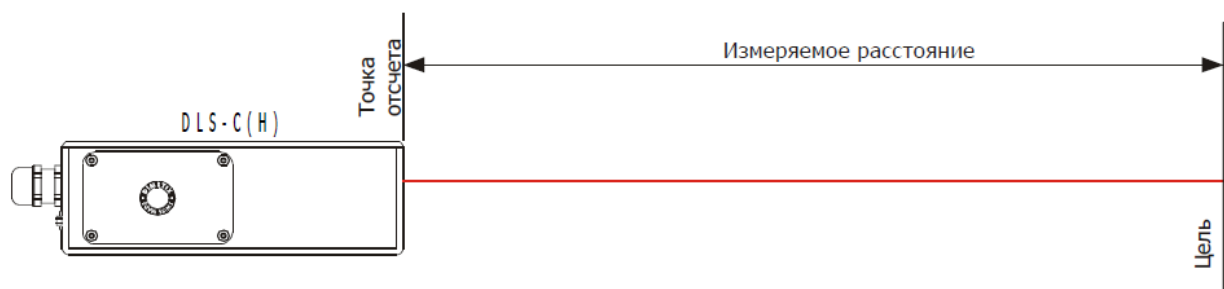


Рисунок 11 – Лазерный дальномер Dimetix Dls

DLS-C(H) это лазерные дальномеры для интеграции в системы автоматизированного управления производством (АСУП). Она позволяет производить измерения расстояний бесконтактным методом, используя отражение лазерного луча.

К основным возможностям дальномера можно отнести:

- 1) Расстояние измерений от 0.05 до 500 м;
- 2) Интерфейс ввода/вывода (RS232 и RS422);
- 3) Подключение до 10 приборов на одну линию RS422;
- 4) Широкий перечень питания (9...30В переменного тока);

- 5) Программируемый аналоговый выход (0/4...20mA);
- 6) Два программируемых цифровых выхода (D01 и D02);
- 7) Цифровой выход для сигнализации ошибки;
- 8) D-Sub коннектор и клемма с винтовым креплением для быстрого подключения;

2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата

Объектом регулирования является привод крана-штабелера. А именно мотор-редуктор и частотный преобразователь. Технологическими координатами с потребностью в регулировании в данном случае являются скорость и положение.

Таким образом, задачами автоматического регулирования являются:

- 1) Точность остановки в заданной позиции не более ± 50 мм.
- 2) Быстродействие системы на уровне контроллера не более 0,4 мкс.

Привод перемещения представляет собой систему подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и, управляющим им, внешним контуром скорости, настроенным на модульный оптимум [3].

Управляющее воздействие представляет собой сигнал задания (U_{zs}) на регулятор положения, с учетом сигнала с датчика положения (лазерного дальномера).

Функциональная схема САР привода представляет собой основные функциональные блоки привода (рисунок 12).

В состав системы регулирования входят: М – асинхронный двигатель, РС – регулятор скорости, РП – регулятор положения, ДП – датчик положения, ДС – датчик скорости, ПЧ – преобразователь частоты.

Упрощенная функциональная схема системы автоматического регулирования приводом перемещения представлена на рисунке 12.

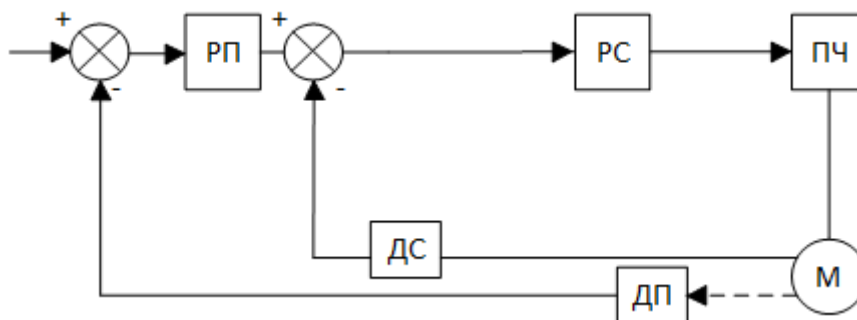


Рисунок 12 – Упрощенная функциональная схема системы автоматического регулирования приводом перемещения

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

Регуляторами технологических координат являются регуляторы положения и скорости. Исходя из технологического процесса, кранштабелер должен обеспечивать транспортировку груза, который находится на разном удалении от начальной точки. Сигнал с лазерного датчика положения крана координирует работу механизма, в соответствии с чем, он автоматически определяет требуемое расстояние.

2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

В данном разделе будут разработаны структурная схема САУ и модели типовых режимов работы приводов для каждой оси.

Разработка САУ и модели для передвижения по оси X

Система автоматического управления приводом крана-штабелера состоит из внутреннего оптимизированного контура регулирования момента (ОКМ). ОКМ включает в себя преобразователь частоты, статорную цепь асинхронного двигателя и регулятор момента, настроенный на модульный оптимум. В этом случае контур момента представляет собой колебательное звено:

$$W(p) = \frac{1}{K_{ом}} \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}, \quad (50)$$

Так как наименьшей постоянной времени T_{μ} обладает преобразователь частоты, являющийся наиболее быстродействующим исполнительным элементом в регулируемой системе, значение постоянной времени принимается равным:

$$T_{\mu} = 0,05 \text{ с}$$

Однако с учетом того, что постоянная времени T_{μ} слишком мала, контур регулирования момента может быть аппроксимирован апериодическим звеном первого порядка. Тогда он примет вид:

$$W(p) = \frac{1}{K_{ом}} \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}, \quad (51)$$

Коэффициент обратной связи по моменту рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{упр.мах}}}{2 \cdot M_{\text{дв.мах}}}, \quad (52)$$

Тогда, по формуле (52):

$$K_{\text{ом}} = \frac{10}{2 \cdot 60} = 0,083,$$

Контур регулирования скорости, исходя из требований технологического процесса, должен обеспечивать формирование управляющего сигнала по скорости, поэтому состоит из пропорционального регулятора скорости и обратной связи по скорости.

В этом случае передаточная функция регулятора скорости будет равна:

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}}, \quad (53)$$

где K_{pc} – коэффициент подачи регулятора скорости, который можно найти по формуле (54).

$$K_{\text{pc}} = \frac{K_{\text{ом}} \cdot J_s}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{oc}}}, \quad (54)$$

где K_{oc} – коэффициент обратной связи по скорости.

Коэффициент обратной связи по скорости можно найти по формуле (55):

$$K_{oc} = \frac{U_{упр. max}}{W_{дв. max}}, \quad (55)$$

где $\omega_{дв max} = 854,4$ рад/с – максимальная скорость двигателя.

Тогда:

$$K_{oc} = \frac{10}{854,4} = 0,012$$

$$K_{pc} = \frac{0,083 \cdot 0,345}{4 \cdot 0,05 \cdot 0,012} = 11,93$$

Тогда структурная схема регулирования моментом и скоростью будет выглядеть в соответствии с рисунком 13.

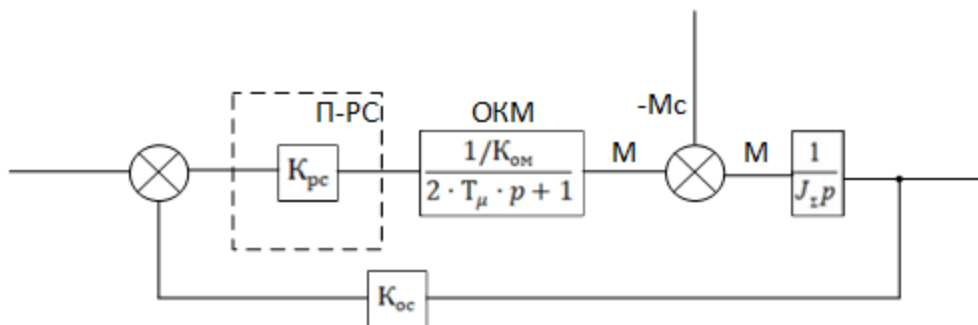


Рисунок 13 – Упрощенная структурная схема регулирования моментом и скоростью асинхронного двигателя с аппроксимированным внутренним контуром

Для управления перемещением крана-штабелера необходимо построить контур регулирования положения, являющийся внешним. Если считать контур регулирования скорости оптимизированным, то, согласно принципам

подчинённого регулирования, структурная схема контура регулирования положения может быть представлена на рисунке 14.

Упрощенная структурная схема регулирования положения представлена на рисунке 14.

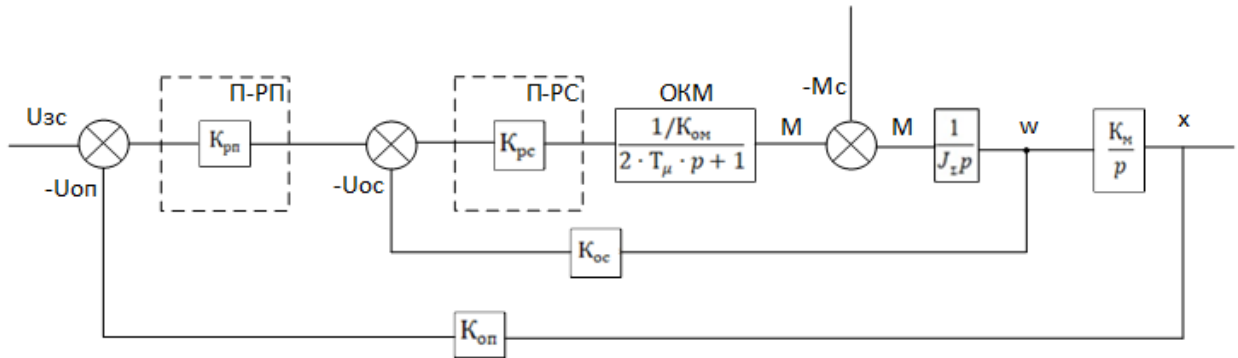


Рисунок 14 – Упрощенная структурная схема регулирования положения

Коэффициент преобразования угловой скорости двигателя в линейную скорость можно найти по формуле:

$$K_M = \frac{V_H}{\omega_H}, \quad (56)$$

$$K_M = \frac{1,6}{854,4} = 0,0019,$$

Коэффициент обратной связи по положению определяется по формуле:

$$K_{оп} = \frac{U_{уст.макс}}{S_{макс}}, \quad (57)$$

$$K_M = \frac{10}{100} = 0,1,$$

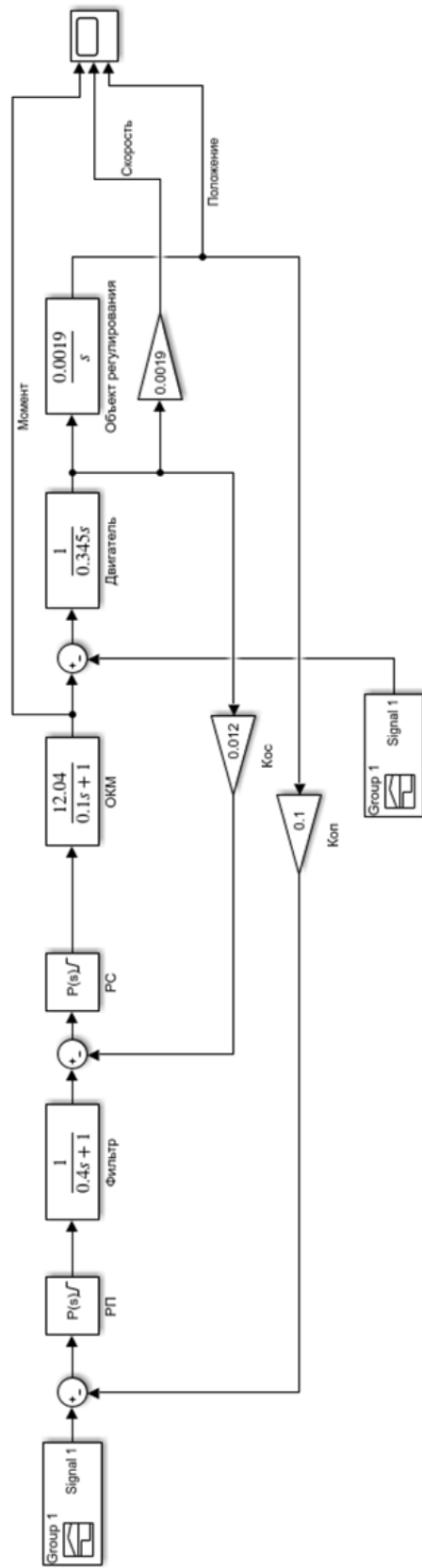


Рисунок 15 – Математическая модель системы управления приводом крана-штабелера для оси X

Модель для передвижения по оси X и результат моделирования представлены на рисунках 15 и 16.

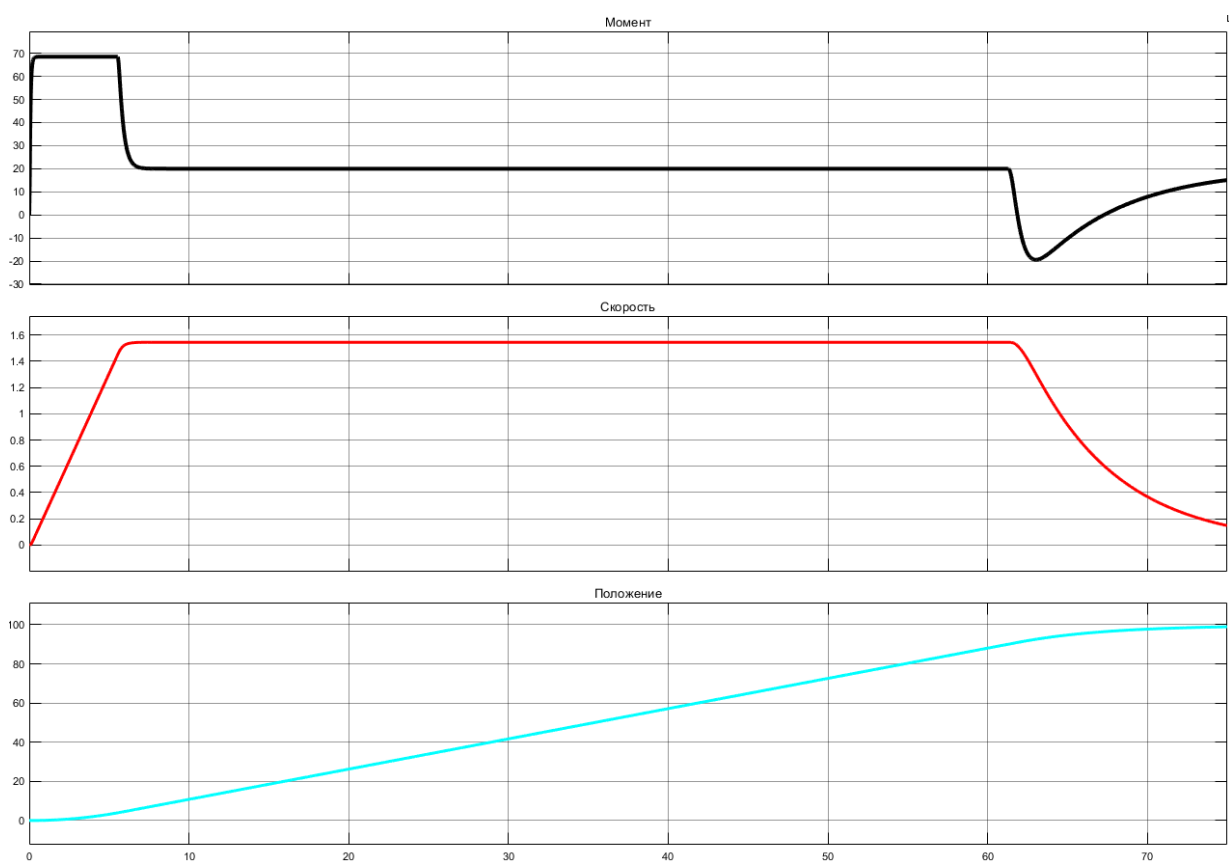


Рисунок 16 - Результат моделирования при перемещении крана-штабелера по оси X

Кран-штабелер не выходит за пределы крайней скорости (1,6 м/с), что удовлетворяет поставленным требованиям.

Разработка САУ и модели для передвижения по оси Y

Разработка САУ и модели для передвижения по оси Y была выполнена аналогично движению по оси X. Разработанная модель представлена на рисунке 17.

Результат моделирования при перемещении крана-штабелера по оси Y представлен на рисунке 18.

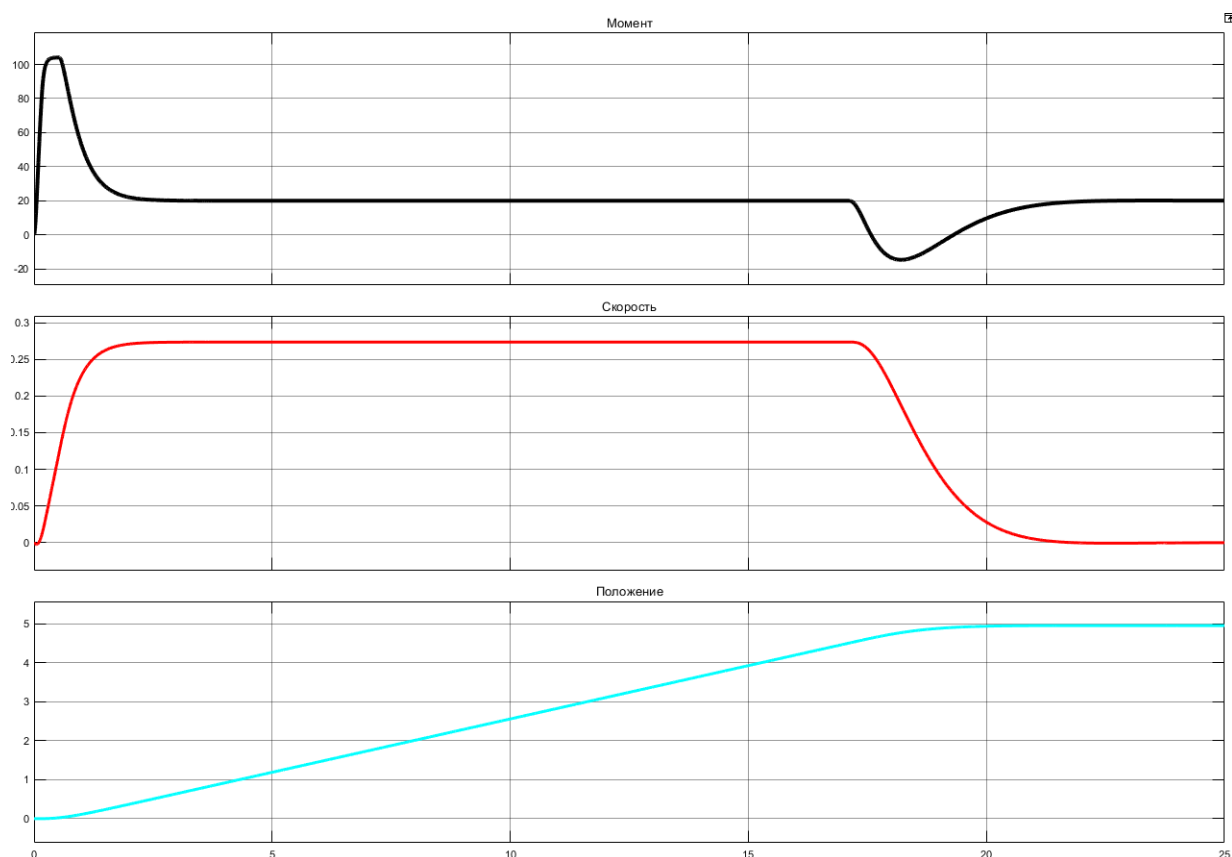


Рисунок 18 - Результат моделирования при перемещении крана-штабелера по оси Y

Кран-штабелер не выходит за пределы крайней скорости (0,3 м/с), что удовлетворяет поставленным требованиям.

Разработка САУ и модели для передвижения по оси Z

Разработка САУ и модели для передвижения по оси Z была выполнена аналогично движению по оси X и Y. Разработанная модель представлена на рисунке 19.

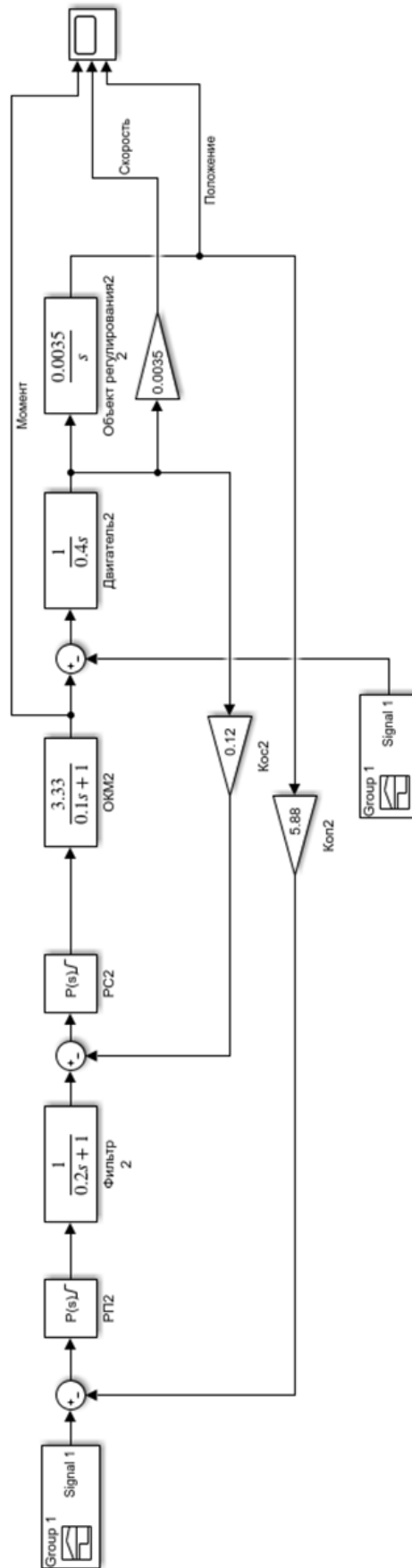


Рисунок 19 – Математическая модель системы управления приводом крана-штабелера для оси Z

Результат моделирования при перемещении крана-штабелера по оси Z представлен на рисунке 20.

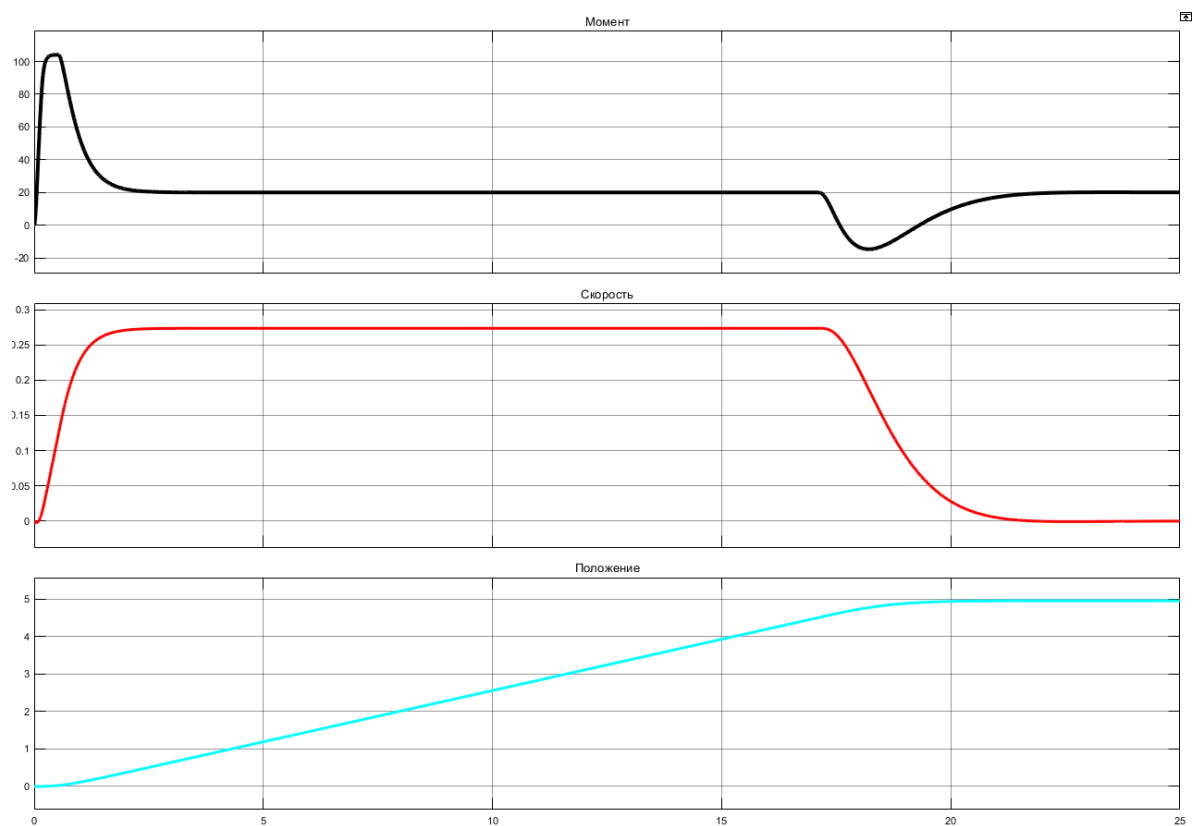


Рисунок 20 - Результат моделирования при перемещении крана-штабелера по оси Z

Кран-штабелер не выходит за пределы крайней скорости (0,3 м/с), что удовлетворяет поставленным требованиям.

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

3.1 Расчет сметы капитальных затрат

Величина капитальных вложений рассчитывается как сумма затрат на приобретение, транспортировку, монтаж и строительные работы.

$$K = C_{об} + T_p + Z_{смп} + Z_{нр} + Z_{пр}, \quad (58)$$

где K – общая величина капитальных вложений, руб;

$C_{об}$ – стоимость оборудования, руб;

T_p – транспортные расходы, руб;

$Z_{смп}$ – затраты на строительно-монтажные работы, руб.

$Z_{нр}$ – непредвиденные расходы, руб.

$Z_{пр}$ – затраты на прочее неучтенное оборудование, руб.

Сведем расчет стоимости приобретенного оборудования по таблице 1.

Прочее неучтенное оборудование (кабели, проводка и прочее) примем в размере 20% от стоимости учтенного оборудования.

Таблица 9 – Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во	Итого
Контроллер	40000	9	360000
Блок питания	20000	9	180000
Преобразователь частоты	10000	18	180000
Лазерный дальномер	100000	9	900000

Продолжение таблицы 9

Компьютер	30000	1	30000
Программа WinCC	50000	1	50000
Кран-штабелер ТС-10	700000	9	6300000
Итого учтенного оборудования:			8000000
Итого неучтенного оборудования:			1600000
Итого стоимость всего оборудования:			9600000

Затраты на монтаж $Z_{\text{СМР}}$ определим в размере 15% от стоимости оборудования, транспортные расходы T_p – 10%, резерв на непредвиденные расходы $Z_{\text{НР}}$ – 5 % [2]:

$$T_p = Ц_{\text{об}} \cdot 0,15 = 8000000 \cdot 0,15 = 1200000 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{СМР}} = Ц_{\text{об}} \cdot 0,1 = 8000000 \cdot 0,1 = 800000 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{НР}} = Ц_{\text{об}} \cdot 0,05 = 8000000 \cdot 0,05 = 400000 \text{ руб}$$

Согласно формуле (58), общая величина капитальных вложений во всю систему определена:

$$K = 9600000 + 1200000 + 800000 + 400000 = 12000000 \text{ руб}$$

3.2 Расчет РСЭО

Так как, на данный момент на рассматриваемом складе работа идет без использования оборудования, то есть ручным трудом, то затраты на содержание будут включать основную и дополнительную заработную плату рабочих, отчисления в социальные фонды, прочие расходы и материальные затраты.

$$I_{\text{тек1}} = Z + O_{\text{сн}} + П_{\text{р}} + М, \quad (59)$$

Общий фонд заработной платы складывается из основной и дополнительной заработной платы производственных рабочих.

К основной заработной плате относится оплата труда по тарифным ставкам и окладам на основе тарифной сетки по оплате труда рабочих (ТСР), учитывающей разряд работ и уровень оплаты труда [2].

Кроме оплаты труда по тарифным ставкам и должностным окладам, работникам различных категорий установлены соответствующие доплаты компенсирующего, стимулирующего характера, выплаты с целью регионального регулирования и мотивационного характера.

Доплаты на работах с тяжелыми, вредными и (или) опасными условиями труда – 12 %, а особой тяжелыми и особо вредными – 24 % тарифной ставки (оклада).

Можно принять при двухсменном графике работы 3,33 % тарифной ставки (оклада) с учетом доплаты за условия труда. Доплаты за работу в праздничные дни – в двойном размере. Склад работает круглый год без выходных, то есть 365 дней. Количество праздничных дней в году составляет примерно 15 дней. Согласно политике предприятия за работу без претензий

премия 100% к тарифной ставке (окладу). Тарифная ставка кладовщика составляет 80 руб/час.

Общая сумма заработной платы за год, которая выплачивается кладовщикам, заменяющим проектируемый агрегат, равна:

$$З=(365-15+2\cdot 15)\cdot 8\cdot 80\cdot 2\cdot 1,04\cdot 1,15\cdot 10=5817344\text{руб}$$

где 8 – часов в сутки;

80 – часовая ставка работников фасовочного оборудования;

2 – коэффициент премии, установленная по предприятию;

1,04 – процент доплаты за физические перегрузки;

1,15 – районный коэффициент Уральского региона;

10 – кладовщиков на смене.

Отчисления на социальные нужды установлены в размере 30 % от общего фонда ЗП. Они включают в себя отчисления в пенсионный фонд РФ (22 %), федеральный фонд обязательного медицинского страхования (5,1 %), территориальный фонд обязательного медицинского страхования (2,9 %).

$$O_{\text{сн}}=0,3\cdot 5817344=1745203\text{руб}$$

Прочие расходы составляют 3 % от фонда заработной платы.

$$П_{\text{р}}=0,03\cdot 5817344=174520\text{руб}$$

Расчет затрат на основные материалы, полуфабрикаты и запасные части производится на основании норм расхода каждого вида материалов и запасных частей.

$$M = \mathcal{E} + Z_m, \quad (60)$$

Униформу и инструменты необходимо менять раз в год, их стоимость составляет 30000 руб. Тогда затраты на их покупку, доставку (10 %), монтаж (15 %) и непредвиденные расходы (5 %) определены выражением.

$$Z_m = 30000 \cdot (1 + 0,1 + 0,05) = 34500 \text{ руб}$$

Затраты на электроэнергию:

$$\mathcal{E} = 290 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 3,3 \cdot 1 = 45936 \text{ руб}$$

где 290 – планируемое количество дней работы оборудования;

1 – коэффициент использования оборудования;

6 – потребляемая мощность на освещение и бытовые приборы, кВт;

3,3 – стоимость электроэнергии для промышленных предприятий, руб;

8 – часы работы в сутки.

Таким образом, материальные затраты равны:

$$M = 34500 + 45936 = 80436,$$

где 39000 – сумма затрат на приобретение ремней, руб;

45936 – сумма затрат на электроэнергию, руб.

Таким образом, с учетом всех рассчитанных значений, сумма расходов в год для рассматриваемого участка фасовочной линии равна:

$$I_{\text{тек1}} = 5817344 + 1745203 + 174520 + 80436 = 7863439 \text{ руб}$$

РСЭО проектируемого агрегата

Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО) за год определяются суммой экономических элементов согласно формуле:

$$I_{\text{тек2}} = Z + O_{\text{сн}} + P + M + A, \quad (61)$$

где $I_{\text{ТЕК2}}$ – эксплуатационные расходы, руб;

Z – основная и дополнительная заработная плата, руб;

$O_{\text{сн}}$ – отчисления на социальные нужды, руб;

M – материальные затраты (электроэнергия и колеса), руб;

В рамках данной работы экономическая выгода будет заключаться в сокращении затрат на заработную плату (основную и дополнительную) и тем самым в отчислении в социальные фонды. Это будет достигаться путем замены ручного труда на автоматический агрегат.

Таким образом затраты на заработную плату и отчисления в социальные фонды будет следующим:

$$Z = (365 - 15 + 2 \cdot 15) \cdot 8 \cdot 80 \cdot 2 \cdot 1,04 \cdot 1,15 \cdot 2 = 1163468 \text{ руб}$$

где 8 – часов в сутки;

80 – часовая ставка работников фасовочного оборудования;

2 – коэффициент премии, установленная по предприятию;

1,04 – процент доплаты за физические перегрузки;

1,15 – районный коэффициент Уральского региона;

2 – кладовщиков на смене.

Отчисления на социальные нужды установлены в размере 30 % от общего фонда ЗП. Они включают в себя отчисления в пенсионный фонд РФ (22 %), федеральный фонд обязательного медицинского страхования (5,1 %), территориальный фонд обязательного медицинского страхования (2,9 %).

$$O_{\text{сн}}=0,3 \cdot 1163468=349040 \text{ руб}$$

Прочие расходы составляют 3 % от фонда заработной платы.

$$P_p=0,03 \cdot 1163468=34904,$$

Ремни установки необходимо менять раз в год, их стоимость составляет 30000 руб. Тогда затраты на их покупку, доставку (10 %), монтаж (15 %) и непредвиденные расходы (5 %) определены выражением:

$$Z_m=30000 \cdot (1+0,1+0,15+0,05)+34500=73500 \text{ руб}$$

где 34500 – материальные затраты без учета затрат на оборудование

Затраты на электроэнергию:

$$\mathcal{E}=290 \cdot (1,5+4+0,12) \cdot 8 \cdot 9+45936=163281 \text{ руб}$$

где 290 – планируемое количество дней работы оборудования;

1,5 – мощность мотор-редуктора (ось X), кВт;

4 – мощность мотор-редуктора (ось Y), кВт;

0,12 – мощность мотор-редуктора (ось Z), кВт;

3,3 – стоимость электроэнергии для промышленных предприятий, руб;

8 – часы работы в сутки;

9 – количество кранов-штабелеров.

45936 – затраты на электроэнергию без учета оборудования.

Таким образом, материальные затраты равны:

$$M=73500+163281=236781 \text{ руб}$$

где 73500 – сумма затрат на заменители, руб;

163281 – сумма затрат на электроэнергию, руб.

Амортизационные отчисления есть отчисления части стоимости основных фондов для возмещения их износа. Амортизационные отчисления включены в издержки производства. С помощью накопления этих отчислений производят финансирование мероприятий по ликвидации износа основных фондов путем замены физически изношенных и морально устаревших объектов новыми.

Величина амортизации определяется согласно нормам амортизационных отчислений по основным фондам и первоначальной стоимости основных фондов.

Амортизацию можно найти по формуле:

$$A = \frac{H_A}{100} \cdot K, \quad (62)$$

Годовая норма амортизации устанавливаемого оборудования равна:

$$H_A = \frac{100}{C_3} = \frac{100}{10} = 10\%, \quad (63)$$

где C_3 – срок полезного использования, равный 10 лет.

Исходя из этого, амортизация равна:

$$A = \frac{10}{100} \cdot 12000000 = 1200000 \text{ руб}$$

Подставив все рассчитанные значения в формулу 3 и получим РСЭО для проектируемого агрегата:

$$I_{\text{ТЕК2}} = 1163468 + 349040 + 34904 + 236781 + 1200000 = 2984193 \text{ руб}$$

3.3 Расчет срока окупаемости проекта

Таким образом, затраты на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО) за год при «старой» и «новой» моделям определены соответственно значениями, представленными ниже.

Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО) равны:

$$I_{\text{ТЕК1}}=7863439 \text{ руб}$$

$$I_{\text{ТЕК2}}=2984193 \text{ руб}$$

Для определения срока окупаемости необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{год}}}, \quad (64)$$

где K – капитальные затраты, руб;

$\mathcal{E}_{\text{год}}$ – экономия в год, руб.

Экономия в год равна разнице расходов на содержание старой модели и расходов на содержание и эксплуатацию новой.

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = I_{\text{ТЕК1}} - I_{\text{ТЕК2}}, \quad (65)$$

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 7863439 - 2984193 = 4879246 \text{ руб}$$

Таким образом, согласно формуле (64), срок окупаемости равен:

$$T_{\text{ок}} = \frac{12000000}{4879246} = 2,45 \text{ года}$$

По рассчитанным данным составляется сводная таблица технико-экономических расходов. В нее сводятся следующие параметры:

- 1) Капитальные вложения;
- 2) РСЭО;
- 3) Срок окупаемости;
- 4) Экономия в год.

Таблица 10 – Сводная таблица технико-экономических расчетов

Наименование показателя	Значение показателя до	Значение показателя после	Отклонения
Капитальные вложения, руб.	0	12000000	12000000
РСЭО, руб.:	7863439	2984193	-4879246
- электроэнергия, руб.	45936	161281	115345
– фонд заработной платы, руб.	5817344	1163468	-4653876
– страховые взносы, руб.	1745203	349040	-1396163
– материальные затраты, руб.	80436	236781	156345
– прочие расходы, руб.	174520	34904	-139616
– амортизация, руб.	0	1200000	1200000

Продолжение таблицы 10

Итого экономия в год, руб.	4879246
Срок окупаемости, год.	2,45

В данном разделе были выполнены расчеты срока окупаемости разработанного проекта.

Для показателя РСЭО были рассчитаны показатели электроэнергии, фонд заработной платы, страховые взносы, материальные затраты, прочие расходы.

По этим данным были рассчитаны показатели РСЭО до внедрения разработки и после внедрения разработки. На основе этих вычислений был составлен расчет экономии в год и срока окупаемости.

Стоимость проекта составила 12000000 рублей. Экономия в год 4879246 рублей. Срок окупаемости составил 2,45 года.

По итогу можно сделать вывод, что проект выгоден для производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной выпускной квалификационной работы была выполнена разработка мехатронной системы автоматического дистанционного управления кранов-штабелеров для склада копрового цеха ПАО «ЧМК».

Была разработана система автоматизации крана-штабелера. В результате работы произведен расчет технико-экономических показателей внедрения оборудования в технологический процесс.

Были определены требования к электроприводу и системе автоматизации, построена нагрузочная диаграмма и тахограмма работы привода для трех осей движения крана-штабелера.

В ходе выпускной квалификационной работы были рассмотрены технико-экономические параметры копрового цеха ПАО «ЧМК», в который интегрировалось оборудование. Капитальные затраты на установку оборудования составили 12000000 руб. Данная сумма включает расходы на транспортировку оборудования, его установку и непредвиденные расходы. В расчет также вошло вспомогательное оборудование.

Годовая экономия средств идущих на заработную плату, отчисления на социальные нужды, материальные затраты, амортизационные отчисления и прочие расходы составили 4879246 руб.

Срок окупаемости оборудования в ходе расчёта составил 2,45 года. Таким образом, поставленные задачи и цели выпускной квалификационной работы можно считать выполненными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Гохберг М.М. Справочник по кранам. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / М.М. Гохберг – Л. Машиностроение, 1988. – 559 с.
- 2 Гохберг М.М. Справочник по кранам. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы / М.М. Гохберг, Попов, М.П. Александров. В 3 кн. – Л: Машиностроение, 1988 – 559 с.
- 3 Александров М.П. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров, К.Д. Никитина. – ТОМСК: изд-во Раско 1993 – 257 с.
- 4 Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 614 с.
- 5 Кузьмин А.В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин / А.В. Кузьмин. – М: Изд-во МАИ, 1983. – 350 с.
- 6 Вейнгер А. М. Регулируемые электроприводы переменного тока: учебное пособие / А.М. Вейнгер. – Москва: Изд-во МЭИ, 2009. – 103 с.
- 7 Терехов В. М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 305 с.
- 8 Фомин Н. В. Системы управления электроприводов: Учеб. Пособие / Н.В. Фомин. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 87 с.
- 9 Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона принт., 2001. — 320 с.
- 10 Попп Т.В. Определение экономической эффективности технических решений в дипломных проектах: методические указания к выполнению экономической части дипломного проектирования / Т.В. Попп. – Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 32 с.

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

12 Бахольская Л.И. Экономика, организация и планирование производства: Методические указания по дипломному и курсовому проектированию для студентов специальности 180400 дневной и заочной форм обучения / Л.И. Бахольская. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 72 с.

13 Каталог промышленного оборудования фирмы Siemens. – <https://www.siemens-pro.ru>

14 SIEMENS, Система автоматизации SIMATIC S7-300. Данные модулей: каталог / SIEMENS, 2006. – 261 с.