Образовательная автономная некоммерческая организация
высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Специальность 08.02.09 Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий

(код) (наименование)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

на тему Модернизация электропривода механизма передвижной тележки мостового крана грузоподъемностью 16 тонн, ПАО «РОССЕТИ» г. Санкт-Петербург

Обучающийся _____
(Ф.И.О. полностью) подпись

Руководитель Мунхоев Леонид Иванович _____
(Ф.И.О. полностью) подпись

МОСКВА 2023

Образовательная автономная некоммерческая организация
высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

ЗАДАНИЕ
на дипломную работу
обучающемуся (щейся)

1. Тема: Модернизация электропривода механизма передвижной тележки мостового крана грузоподъемностью 16 тонн, ПАО «РОССЕТИ» г. Санкт-Петербург

2. Срок сдачи обучающимся законченной работы «16» сентября 2023 г.
3. Исходные данные к ВКР: научная и учебная литература, интернет ресурсы и др.
4. Содержание ВКР (перечень подлежащих разработке вопросов):

ВВЕДЕНИЕ
1. Описание технологического процесса мостового крана
1.1 Назначение, устройство и принцип действия мостового крана
1.2 Кинематическая схема механизма тележки мостового крана
1.3 Анализ существующей системы управления электроприводом
1.4 Требования к электроприводу механизма тележки мостового крана
2. Расчет статических сил сопротивлений и выбор электродвигателя
2.1 Расчет нагрузок механизма тележки
2.2 Расчет основных параметров электродвигателя и построение статических характеристик электродвигателя
3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
3.1 Выбор закона регулирования электроприводов. Структурная схема электропривода
3.2 Синтез регуляторов структурной схемы асинхронного привода с векторным управлением со стабилизацией потокосцепления ротора
3.3 Анализ структурной схемы S-образного задатчика интенсивности
3.4 Разработка математической модели электропривода
4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

5. Перечень графического материала 5 таблиц, 32 рисунков.
6. Приложения -.
7. Чертежей 5.

Дата выдачи задания 16 марта 2023 Задание принял (дата) 16 марта 2023
Подпись руководителя _____ Подпись обучающегося

РЕФЕРАТ

Модернизация электропривода механизма тележки мостового крана: выпускная квалификационная работа / ВШТЭ СПбГУПТД, СПб., объем 60 с., 4 гл., 13 илл., 3 табл., 11 источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭЛЕКТРОПРИВОД, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ АСИНХРОННЫЙ, ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объектом модернизации является электропривод механизма тележки мостового крана.

Цель работы – модернизация электропривода механизма тележки мостового крана путем замены асинхронного электродвигателя с фазным ротором на частотный электропривод, что позволит улучшить энергоэффективность.

В процессе работы были выбраны: электродвигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором и частотный преобразователь, дополнительное электрооборудование и устройства защиты: сетевой дроссель, выходной фильтр, фильтр электромагнитной совместимости встроен в частотный преобразователь.

В результате проделанной работы был произведен выбор силового оборудования, создана структурная схема управления модернизированной системы управления электроприводом механизма тележки мостового кранав среде MATLAB&SIMULINK.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....5
1. Описание технологического процесса мостового крана.....7
1.1 Назначение, устройство и принцип действия мостового крана.....7
1.2 Кинематическая схема механизма тележки мостового крана.....10
1.3 Анализ существующей системы управления электроприводом.....12
1.4 Требования к электроприводу механизма тележки мостового крана..14
2. Расчет статических сил сопротивлений и выбор электродвигателя.....15
2.1 Расчет нагрузок механизма тележки.....15
2.2 Расчет основных параметров электродвигателя и построение статических характеристик электродвигателя.....21
2.3 Выбор частотного преобразователя.....25
2.4 Выбор дополнительного оборудования и устройств защиты.....29
3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....36
3.1 Выбор закона регулирования электроприводов. Структурная схема электропривода.....36
3.2 Синтез регуляторов структурной схемы асинхронного привода с векторным управлением со стабилизацией потокосцепления ротора.....39
3.2.1 Синтез регулятора контура тока.....39
3.2.2 Синтез регулятора контура стабилизации потокосцепления ротора 41
3.2.3 Синтез регулятора контура момента.....44
3.2.4 Синтез регулятора контура скорости.....46
3.3 Анализ структурной схемы S-образного задатчика интенсивности....49
3.4 Разработка математической модели электропривода.....52
4. Экономический раздел.....55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....65

ВВЕДЕНИЕ

Мостовые краны – очень востребованная линейка грузоподъемных конструкций, охватывающая практически все сферы хозяйства, торговли.

Темой ВКР " Модернизация электропривода механизма передвижной тележки мостового крана грузоподъемностью 16 тонн, ПАО «РОССЕТИ» ЛЕНЭНЕРГО, г Санкт-Петербург ".

Цель – разработать автоматизированный электропривод тележки мостового крана.

Объектом модернизации является электропривод механизма тележки мостового крана.

Данная тема довольна актуальна, поскольку решает вопрос улучшения производственных показателей после модернизации путем замены устаревшего оборудования на новое.

Для решения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- рассчитать статические нагрузки и построить нагрузочную диаграмму и тахограмму;

- выбрать асинхронный электродвигатель;

- выбрать преобразователь частоты и дополнительное оборудование;

- разработать математическую модель и построить графики переходных процессов.

В условиях современного производства все большее распространение получает автоматизированный электропривод. Основными причинами являются: быстрое реагирование на аварийную ситуацию, повышенные возможности энергосбережение, очень высокое качество производства при такой же высокой производительности, а также широкий круг возможностей, не подвластных человеку. Но поскольку очень высокими темпами развиваются микроэлектроника, силовая преобразовательная техника, системы управления электроприводами и другие области науки и техники, то

такие темпы развития приводят к тому, что электрооборудование так же быстро морально стареет и требует модернизации.

В данном ВКР разрабатывается электрооборудование механизма тележки мостового крана. Основное внимание будет обращено на регулирование скорости вращения привода и поддержания ее с требуемой точностью.

Система “частотный преобразователь – асинхронный двигатель” обладает своими преимуществами перед другими системами и является, на данный момент, самой оптимальной системой в любом процессе, где требуется точность позиционирования, бесшумность хода, уменьшенный расход электроэнергии, а также увеличение срока эксплуатации данной системы за счёт отсутствия коммутационных узлов. Экономия электроэнергии может достигать вплоть до 50% за счёт введения микропроцессорного управления.

В работе используются программы для математического моделирования MatLab и графический редактор для создания схем – Authocad.

Данный проект имеет практическую ценность, применение которого позволит на производстве решать проблему с экономией электроэнергии и улучшения показателей производительности.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МОСТОВОГО КРАНА

1.1 Назначение, устройство и принцип действия мостового крана

Объектом модернизации является электропривода механизма тележкикрана мостовогокрана грузоподъемностью1 т

Режим работы крановых механизмов - важный фактор при выборе мощности приводных электродвигателей, аппаратуры и системы управления. От него зависит и конструктивное исполнение механизмов.

В ряде случаев даже однотипные краны работают в разных режимах. Неверный выбор режима при проектировании электропривода кранов ухудшает технико-экономические показатели всей установки. Выбор же более легкого режима обусловливает повышенный износ электрооборудования, частые поломки и простои. Поэтому важно выбрать оптимальный режим работы кранового механизма.

По правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных механизмов установлено четыре номинальных режима работы: легкий (Л), средний (С), тяжелый (Т), весьма тяжелый (ВТ).

Для каждого механизма крана режим работы определяется отдельно, режим работы крана в целом устанавливается по механизму главного подъёма.

Конструкция крана (рис. 1.1) состоит из моста, по рельсам которого перемещается грузовая тележка. Управление краном производится из кабины крановщика, расположенной под рабочей площадкой моста. Для обслуживания питающих крановых троллей и токоприемников предусмотрена кабина для обслуживания троллей. Электрооборудование, расположенное на мосту, тележки и в кабине крановщика, предназначено для управления механизмами крана. Токоподвод к грузовой тележке осуществляется гибким кабелем 6, подвешенным к кареткам, перемещающимся по монорельсу.

Мост крана состоит из двух полумостов, вес каждого из которых равномерно, передается на четыре ходовых колеса. Полумосты шарнирно

соединены между собой переходными балками. Привод передвижения моста -раздельный. Мост оборудован переходными площадками, лестницами, буферами.

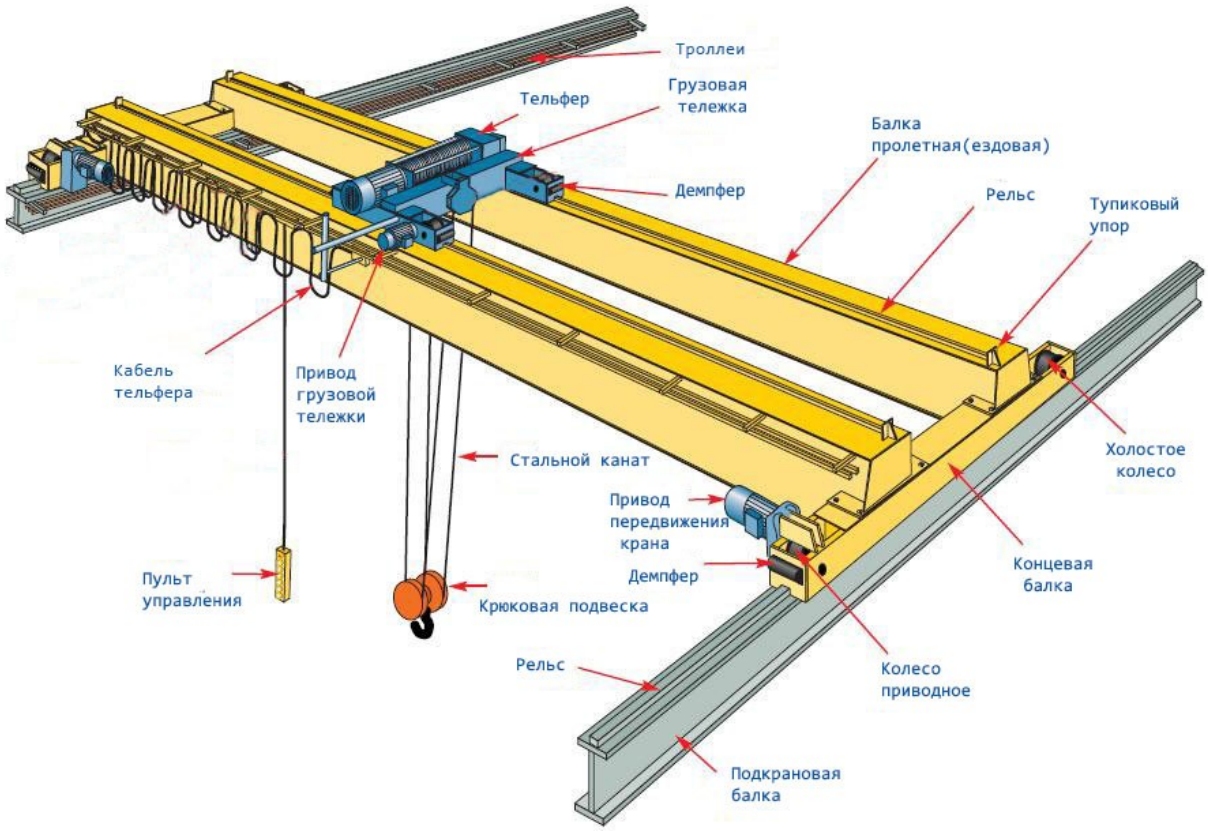


Рисунок 1.1 - Общий вид крана

В соответствии с классификацией подъемно-транспортных машин мостовые краны относятся к устройствам комбинированного перемещения грузов с повторно-кратковременным режимом. Тележка мостового крана является самостоятельным элементом подъёмно-транспортного устройства. Она предназначена для перемещения грузов в пределах пролета мостового крана с технологически заданной скоростью движения и с требуемой точностью позиционирования груза.

При подходе тележки к заданному положению в пролете мостового крана осуществляется электрическое торможение электродвигателя привода тележки для обеспечения необходимой точности остановки, после чего

электропривод отключается и накладывается механический тормоз. Далее включается электропривод передвижения моста, и груз перемещается вдоль цеха согласно технологическому заданию Достигнув указанного места, мост останавливается, опускается груз, и далее выполняются операций технологического цикла согласно табл. 1.1.

Таблица 1.1 - Технологический цикл мостового крана

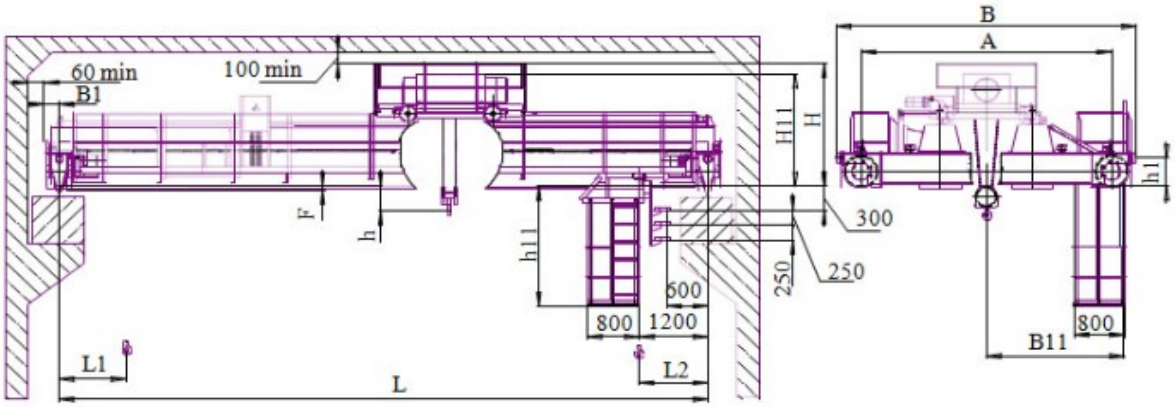
№ операции	Наименование операции
1	Подъём груза
2	Перемещение тележки в заданное положение
3	Перемещение крана в заданное положение
4	Опускание груза
5	Подъём крюка
6	Перемещение моста в исходное положение
7	Перемещение тележки в исходное положение
8	Опускание крюка

Величины допустимых ускорений для механизма передвижения тележки приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Величины допустимых ускорений для механизма передвижения тележки

Наименование операции	Допустимое ускорение, м/с^2
Перемещение грузов с жидким металлом и хрупкими предметами	0,1…0,2
Перемещение грузов со сцепным весом 25%	0,2…0,4
1.1.1 То же 50%	0,4…0,7
1.1.2 То же 100%	0,8…1,4

На рисунке 1.2 изображена схема основных размеров мостового крана грузоподъемностью 16 т.



Высота подъема, м	Пролет крана L, м	Размеры, мм												Нагрузка на колесо, кН	Конструктивная масса, т
		h1	h11	L1 *	L2 *	B	A	B1	H	B11	h*	H11	F		
		не более												не более	
12	10,5	365	1800	1300	1100	5400	4600	220	2200	2200	350	2050	150	110	13,0
	16,5													125	17,2
	22,5		2000					260	2300	2350	480	2150	250	133	19,3
	28,5					5800	5000							149	25,1
	34,5		2200							2450			400	171	33,6

Рисунок 1.2 схема мостового крана с размерами

1.2 Кинематическая схема механизма тележки мостового крана

Кинематическая схема механизма передвижения тележку мостового крана изображена на рисунке 1.3.

На тележке устанавливается грузоподъёмная лебедка с индивидуальным электроприводом. В зависимости от грузоподъемности крана тележка может иметь четыре или восемь ходовых колес.

Механизм передвижения крановых тележек обычно выполняет по схеме с редуктором посредине между приводными колесами.

Движение от электродвигателя I через тормозной шкив 2, редуктор 3, соединительные муфты 4 и вал 5 передается на приводные колеса 6, число которых в предлагаемом задании равны двум. Для удержания тележки в неподвижном положений используется тормозной шкив 2.

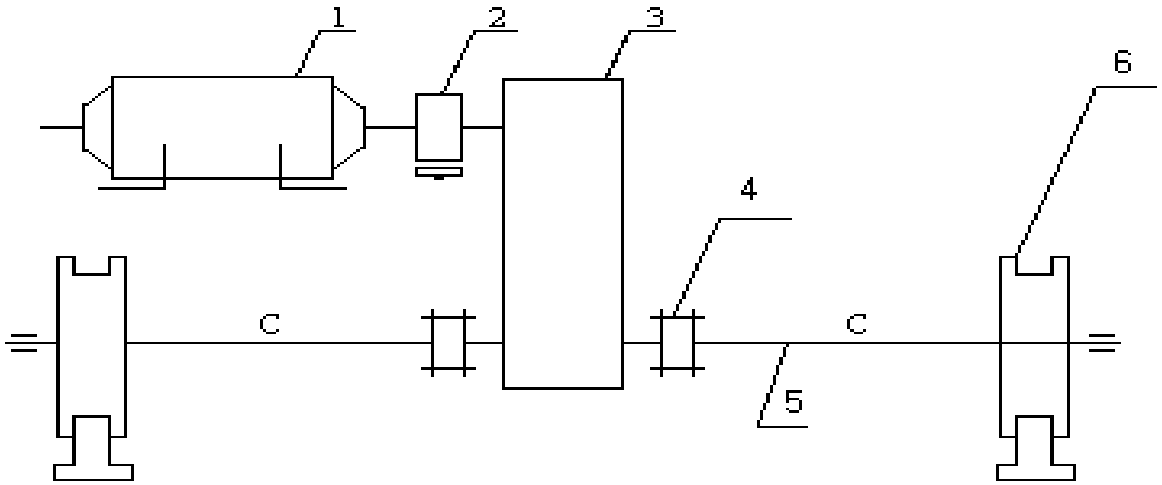


Рисунок 1.3 - Кинематическая схема тележки мостового крана

Ходовые колеса крановых тележек нормально изготавливаются двухрёберными. Однорёберные разрешается использовать для наземных кранов, если ширина колеи не превышает четырех метров.

Технические требования к крану представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические требования крану

Наименование показателя	Величина	Обозначения
Масса груза, (т)	16	$m_{гр}$
Масса тележки, (т)	20	$m_{гру}$
Скорость передвижения тележки, (м/мин)	0,6	$V_{пер}$
Диаметр барабана, (м)	0,8	D_x
Длина пролета, (м)	34,5	L
Допустимое ускорение, (м/с^2)	0,6	a

Продолжение таблицы 1.3

Продолжительность включения (%)	60	ПВ
Количество опор крана	4	$Z_{оп}$
Нагрузка на колесо, не более, кН	40	F_k
Диаметр цапфы, м	0,1	$d_ц$
Наветренная площадь крана и груза	100	S

1.3 Анализ существующей системы управления электроприводом

В существующей схеме управления электроприводом тележки мостового крана (рисунок 1.4) установлен электродвигатель асинхронный с фазным ротором.

Разгон привода осуществляется путем постепенного вывода секций сопротивлений из цепи ротора.

К недостаткам данной схемы можно отнести:

- затраты на обслуживания фазного двигателя;
- отсутствие плавности разгона;
- наличие релейно-контакторной схемы;
- невысокие показатели качества графиков переходного процесса.

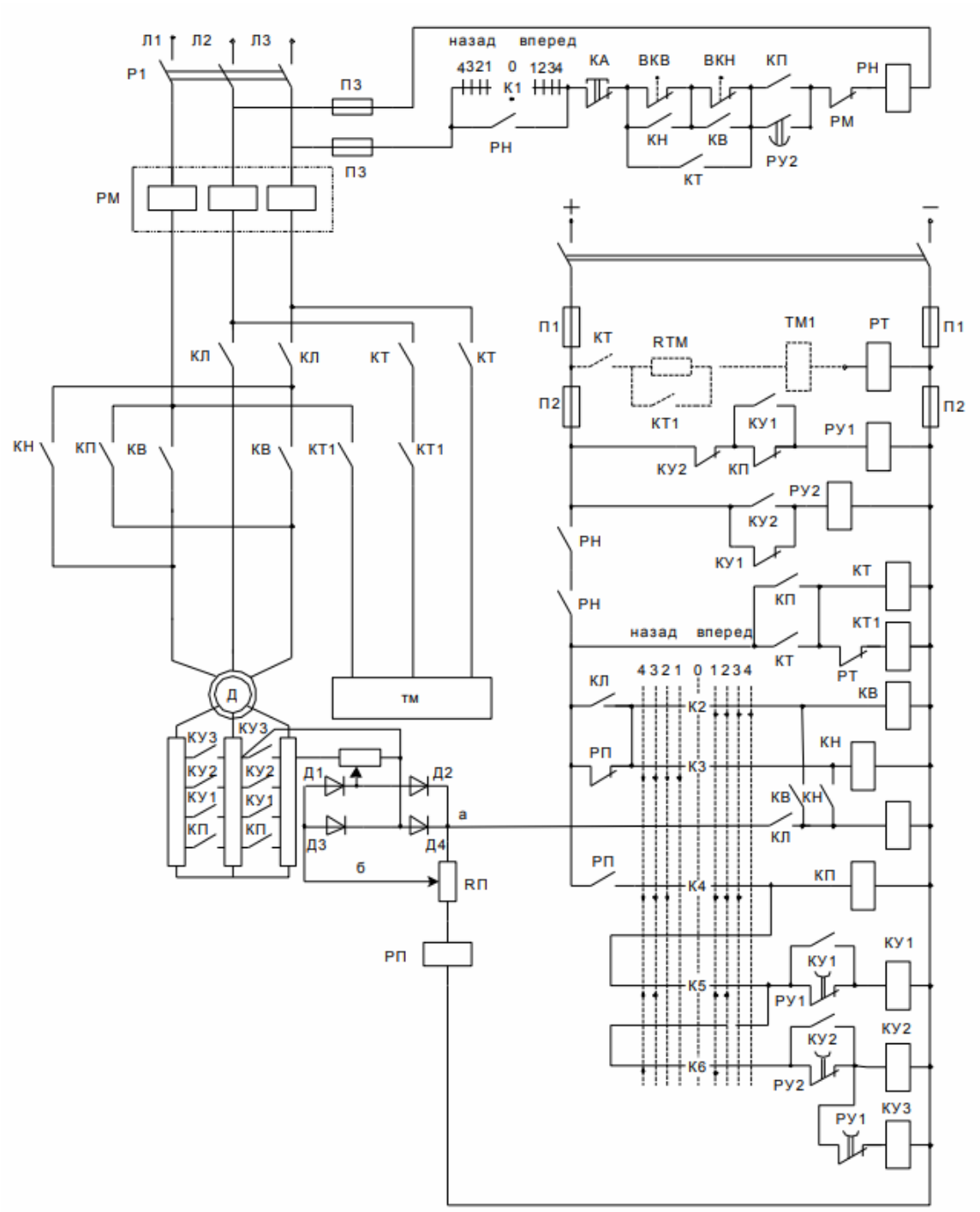


Рисунок 1.4 – Схема управления электродвигателем

1.4 Требования к электроприводу механизма тележки мостового крана

Требования к электроприводу:

- Должен обеспечивать плавный выбор зазора.

- Подъемная машина характеризуется относительно большими величинами маховых масс, поэтому необходимо ограничивать ускорение и рывок для снижения уровня динамических нагрузок. Ограничение рывка позволяет существенно снизить накопление усталостных повреждений.

- Должен обеспечивать большой электромагнитный момент и большую перегрузочную способность (в пределах механической прочности системы).

- Плавное регулирование скорости в диапазоне от 0 до ωн

- Обязательно наличие механического тормоза. Замедление должно осуществляться электрическим торможением с рекуперацией энергии в сеть.

- Простота в настройке и эксплуатации.

Задачи модернизации:

- выбрать частотный преобразователь и элементы системы управления;

- выбрать асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты и дополнительное оборудование;

- произвести математическое моделирование электропривода;

- экономически обосновать правильность модернизации.

2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

2.1 Расчет нагрузок механизма тележки

Для предварительного выбора двигателя необходимо произвести расчет статической мощности механизма крана относительно входного вала редуктора. Для этого требуется последовательно рассчитать максимальную нагрузку на опору, определить по справочнику диаметр колеса, рассчитать количество ходовых колёс, рассчитать силу скатывания и силу нормального давления колеса на рельс, мощности, необходимые для преодоления силы трения в подшипниках, силы трения качения колеса по рельсу, мощность для преодоления ветровой нагрузки.

Максимальная нагрузка на опору:

$$F_{мах.оп} = g \cdot (m_{кр} + m_г) \cdot k_{нр} / z_{оп} = 9,81 \cdot (20 + 16) \cdot 1,6 / 4 = 141,1 кН$$

где $k_{нр}$=1,6 - коэффициент неравномерности распределения нагрузки,

$z_{оп}$ – количество опор крана;

Число ходовых колес в балансировочной тележке:

$$Z_k > F_{мах.оп} / F_к = 141,1 / 40 = 3,53 шт.$$

Принимаем число ходовых колес в балансировочной тележке $Z_к$ = 4.

При нагрузке 20-50 кН на колесо принимаем двухребордное колесо с диаметром $D_к$ = 0,4 м и толщиной 0,1 м.

Сила нормального давления на рельсы крана с грузом

$$F_{нд} = g \cdot (m_{кр} + m_г) = 9,81 \cdot (20 + 16) = 353,2 кН$$

Мощность, необходимая для преодоления силы трения в подшипниках

$$P_{подш} = F_{нд} \cdot f \cdot (d_ц / 2) \cdot \omega_к = 353,2 \cdot 0,02 \cdot (0,1/2) \cdot 0,025 = 0,01 кВт$$

$\omega_к$ – угловая скорость колеса:

$$\omega_к = V \cdot 2 / (D_к \cdot 60) = 0,6 \cdot 2 \cdot (0,8 \cdot 60) = 0,025 рад/с$$

Мощность, необходимая для преодоления силы трения колеса по рельсу

$$P_{кр} = F_{нд} \cdot \mu \cdot \omega_к = 353,2 \cdot 0,4 \cdot 0,025 = 3,53 кВт$$

где μ=0,4 м - коэффициент трения качения колеса по рельсу.

Суммарная мощность, необходимая для преодоления сил трения

$$P_{тр} = (P_{подш} + P_{кр}) \cdot C = (0,01 + 3,53) \cdot 2,5 = 8,85 кВт$$

где С – коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления в ребордах и ступицах колес при перекосах (для подшипников качения С=2,5).

Ветровая нагрузка на кран

$$F_в = p_1 \cdot S = 250 \cdot 100 = 25000 Н$$

где p_1 – распределенная ветровая нагрузка на единицу расчетной наветренной площади (p_1 = 250 Па/м^2).

Мощность, необходимая для преодоления ветровой нагрузки

$$P_в = F_в \cdot V / 60 = 25000 \cdot 0,6 / 60 = 250 Вт$$

Статическая мощность, развиваемая электродвигателем

$$P_{ст} = (P_{ск} + P_{тр} + P_{в}) / (\eta \cdot Z_{ОП}) = (0 + 8,85 + 0,25) / (0,85 \cdot 4) = 2,676\,кВт$$

По полученной мощности и угловой скорости по каталогу [2] выбираем двигатель МТКН 111-6, 380 В, 50 Гц, мощностью 3500 Вт, номинальная скорость 865 об/мин.

В таблице 2.1 приведены основные технические характеристики электродвигателя.

Таблица 2.1 Параметры электродвигателя

Наименование величины	Об.	Величина	Единицы измерения
Частота	f_1	50	Гц
Число фаз	m	3	
Мощность	P_2	3500	Вт
Фазное напряжение	U_{1n}	220	В
Линейное напряжение	U_s	380	В
Синхронная скорость	n_1	1000	Об/мин
Номинальная скорость	n_2	865	Об/мин
Число пар полюсов	p_0	3	-
Номинальный коэффициент полезного действия (КПД)	$\eta_н$	0,745	-
Момент инерции ротора	$J_{ДВ}$	0,042	Кг·м^2
Номинальный коэффициент мощности	$\cos\varphi_н$	0,8	-
Кратность пускового тока	i_k	6,5	-

Перегрузочная способность по моменту	m_k	2,75	-

Номинальная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{n_{\text{ном}} \cdot \pi}{30} = \frac{865 \cdot \pi}{30} = 90,6 \text{ рад/с}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.ном}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{\omega_{\text{дв.ном}}} = \frac{3500}{90,6} = 38,6 \text{ Нм}$$

Расчётный коэффициент передачи редуктора в соответствии

$$i_{\text{рас}} = \frac{\omega_{\text{дв.ном}}}{\omega_{\text{к}}} = \frac{90,6}{0,025} = 3612$$

По каталогу выбираем редуктор с реальным передаточным отношением

$$i_{\text{реал}} < i_{\text{рас}}$$
$$i_{\text{реал}} = 3612$$

Затем определяем рабочую скорость двигателя

$$\omega_{\text{дв.ном}} = i_{\text{рас}} \cdot \omega_{\text{к}} = 3612 \cdot 0,025 = 90,6 \text{ рад/с}$$

Проверка электродвигателя на перегрузочную способность проводится в следующей последовательности.

Определяется динамический момент при разгоне по формуле

$$M_{дин} = J \cdot d\omega / dt = J \cdot (\omega_{дв.раз} / t_{раз})$$

Где J определим по формуле:

$$J = J_{дв} + J_{мех}'$$

где $J'_{мех}$ - приведенный к оси двигателя момент инерции механизма определяется по формуле

$$J_{мех}' = \Sigma W \cdot 2 / \omega_{дв.раб}^2$$

Суммарная кинетическая энергия ΣW – это сумма кинетических энергий вращающихся и поступательно двигающихся элементов портального крана.

Кинетическая энергия колес крана согласно

$$W_K = Z_{оп} \cdot Z_k \cdot J_k \cdot \omega_k^2 / 2 = 4 \cdot 4 \cdot 49 \cdot 0,025^2 / 2 = 0,245 Дж$$

где $J_к$ - момент инерции колеса, как сплошного цилиндра, согласно

$$J_k = 3,14 \cdot b \cdot \rho_k \cdot D_k^2 / 2 \cdot 16 = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 7800 \cdot 0,8^2 / 2 \cdot 16 = 49 кг \cdot м^2$$

где ρ = 7800 кг/ – удельная плотность стали.

Кинетическая энергия поступательно движущихся частей крана в соответствии с

$$W_{кр.пос} = (m_{kp} + m_г) \cdot V^2 / 2 = (20 + 16) \cdot 0,01^2 / 2 = 6480 Дж$$

Общая кинетическая энергия крана

$$\Sigma W = W_к + W_{кр.пос} = 6480\,Дж$$

Момент инерции крана, приведенный к валу двигателя определяется по формуле

$$J' = \frac{\Sigma W \cdot 2}{\omega^2_{дв.раб}} = \frac{6480 \cdot 2}{90,6^2} = 1,579\,кг \cdot м^2$$

Момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя, определяется по формуле

$$J = J_{дв} + J_{мех}' = 0,042 + 1,579 = 1,621 кг \cdot м^2$$

Статический момент сопротивления механизма крана, приведенный к оси вала двигателя, согласно

$$M_{ст} = \frac{P_{ст}}{\omega_{дв.ном}} = \frac{2676}{90,6} = 29,54\,Нм$$

Динамический момент, согласно

$$M_{дин.ЭП} = J \cdot \frac{\omega_{дв.ном}}{t_р} = 1,621 \cdot \frac{90,6}{5} = 29,4\,Нм$$

Момент на валу электродвигателя при разгоне в соответствии

$$M_{раз} = M_{ст} + M_{дин} = 29,54 + 29,4 = 59\,Нм$$

Необходимая (расчётная) перегрузочная способность электродвигателя

$$\lambda_{\text{м.рас}} = \text{M}_{\text{раз}} / \text{M}_{\text{дв.ном}} = 59 / 38,6 = 1,53$$

Перегрузочная способность электродвигателя

$$\lambda_{\text{м}} = \text{M}_{\text{дв.мах}} / \text{M}_{\text{дв.ном}} = 2,75$$

Следовательно,

$$\lambda_{\text{м}} > \lambda_{\text{м.рас}}$$

Так как реальная перегрузочная способность двигателя больше требуемой (расчётной), номинальная мощность двигателя больше мощности, необходимой для обеспечения движения крана с установившейся скоростью и номинальная угловая скорость двигателя выше рабочей скорости, то следует считать выбор двигателя верным.

2.2 Расчет основных параметров электродвигателя и построение статических характеристик электродвигателя

Первоначально определяются номинальное значение фазного тока:

$$I_{1n} = \frac{P_{2H}}{m \cdot U_{1H} \cdot \eta_H \cdot \cos \phi_H} = \frac{3500}{3 \cdot 220 \cdot 0,745 \cdot 0,8} = 8,9\ A,$$

Номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 865}{1000} = 0,135$$

Критическое скольжение:

$$s_K = \frac{\left(m_k + \sqrt{m_k^2 + 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1)} - 1\right) \cdot s_n}{1 - 2 \cdot s_n \cdot (m_k - 1)} = \frac{\left(2.75 + \sqrt{2.75^2 + 2 \cdot 0.135 \cdot (2.75 - 1)} - 1\right) \cdot 0.135}{1 - 2 \cdot 0.135 \cdot (2.75 - 1)} =$$

$$= 0.3847$$

Безразмерный коэффициент:

$$b_k = 1 + S_H = 1 + 0.135 = 1.135$$

Механические потери:

$$\Delta P_m = (U_S \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{1n}) \cdot \cos\varphi - P_2) \cdot \left(1 + \frac{n_1^2}{1000^2}\right) \cdot 0.05 =$$

$$= (380 \cdot (\sqrt{3} \cdot 8.9) \cdot 0.8 - 3500) \cdot \left(1 + \frac{1000^2}{1000^2}\right) \cdot 0.05 = 118,5\, Вт$$

Сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_S^2 \cdot (1 - s_n)}{b_k \cdot \left(1 + \frac{b_k}{s_K}\right) \cdot m_k \cdot (P_2 + \Delta P_m)} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{380^2 \cdot (1 - 0,135)}{1.135 \cdot \left(1 + \frac{1,135}{0,3847}\right) \cdot 2,75 \cdot (3500 + 118,5)} = 1,4\, Ом,$$

Сопротивление обмотки ротора:

$$R_2 = \frac{P_2 + \Delta P_m}{3 \cdot (1 - S_k) \cdot I_{1n}^2} \cdot S_n = \frac{3500 + 118,5}{3 \cdot (1 - 0,3847) \cdot 8,9^2} \cdot 0,135 = 2,38\, Ом$$

Индуктивность обмотки статора, учитывающая магнитную связь с двумя другими фазными обмотками статора:

$$L_1 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f_{1H}} \cdot \frac{U_S}{I_H \cdot \left(\sqrt{1 - \cos \phi_H^{\,2}} - \cos \phi_H \cdot s_H / s_K \right)} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{380}{8,9 \cdot \left(\sqrt{1 - 0.8^2} - 0.8 \cdot 0.135 / 0.3847 \right)} = 0,246 \ Гн,$$

Индуктивность обмотки ротора, учитывающая магнитную связь с двумя другими фазными обмотками ротора:

$$L_2 = L_1 = 0.246 \ Гн$$

Индуктивность рассеяния фазной обмотки статора:

$$L_{\sigma s} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_S}{i_k \cdot I_{1n} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 - (R_2 + R_1)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{\sqrt{\left(\frac{380}{6.5 \cdot 8.9 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 - (1.4 + 2.38)^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 12,1 \ мГн$$

Индуктивность намагничивающего контура (взаимная индуктивность, учитывающая магнитную связь одной фазы статора с тремя обмотками ротора и соответственно одной обмотки ротора с тремя обмотками статора):

$$L_m = L_1 - L_{\sigma s} = 0.246 - 0.0121 = 0.234 \ Гн$$

Коэффициенты рассеяния двигателя:

$$Sig = 1 - \frac{L_m^{\,2}}{L_2 \cdot L_1} = 1 - \frac{0.234^2}{0.246 \cdot 0.246} = 0.096$$

Коэффициент:

$$K_2 = \frac{L_m}{L_1} = \frac{0.234}{0.246} = 0.951$$

Постоянная времени фазы обмотки ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0.246}{2.38} = 0.1c$$

Постоянная времени фазы обмотки статора:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0.246}{1.4} = 0.176c$$

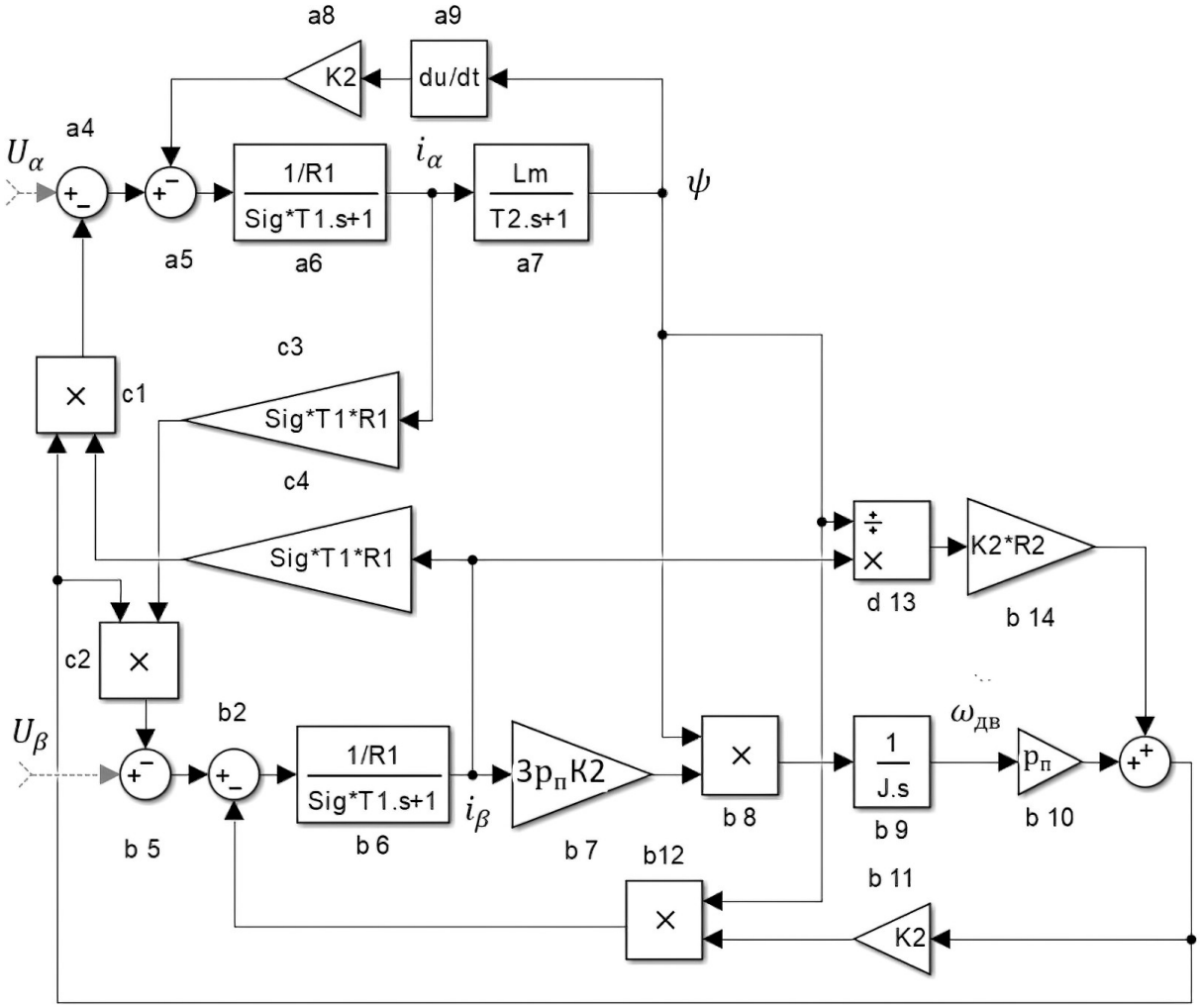


Рисунок 2.1 – Структурная схема двигателя

2.3 Выбор частотного преобразователя

Выбор преобразователя частоты осуществляется, исходя из условий [2]:

$$P_{н.пч} > P_{н.дв},$$
$$I_{н.пч} \geq I_{н.дв}$$
$$U_{н.пч} = U_{с}$$

где $P_{н.пч}$, $P_{н.дв}$ – номинальные мощности преобразователя частоты и двигателя.

Выбираем по условиям преобразователь частоты серии SINAMICS G120 6SL2221-0BE22-UAA0 мощностью 3,5 кВт, данные показаны в таблице 2.2 [8].



Рисунок 2.2 – Частотный преобразователь SINAMICS G120

Частотный преобразователь SINAMICS G120- преобразователь модульного типа, обладающий широким функционалом. Конструкция устройства включает несколько компонентов (модулей). Основные - это CU (блок управления) и PM (силовой блок). CU обеспечивает контроль над силовым компонентом, который, в свою очередь, связан с электродвигателем;

кроме того, система CU дает возможность использовать разнообразные интерфейсы связи для осуществления контроля и мониторинга состояния электропривода.

Таблица 2.2 - Технические данные преобразователя частоты

Номинальное напряжение сети	380...500 В - 15...10 %
Номинальных выходной ток	10 А
Мощность двигателя, кВт	3,5 кВт для тяжелые условия
Степень защиты	IP20

SINAMICS G120 это модульная приводная система, состоящая из двух функциональных блоков.

• управляющий модуль (CU)

• силовой модуль (PM)

Управляющий модуль управляет и контролирует силовой модуль и подключенный двигатель в нескольких типах регулирования по выбору. Он поддерживает связь с локальной или центральной системой управления, а также с устройствами контроля.

Силовой модуль обеспечивает питание двигателя в диапазоне мощностей от 0,37 кВт до 250 кВт.

Различные защитные функции обеспечивают надежную защиту для силового модуля и двигателя.

Функциональные особенности частотника Sinamics G120

• Энергоэффективное векторное управление со встроенным калькулятором

• Автоматическое уменьшение потока с U/f ECO

• Надежность, простое и быстрое программное параметрирование

• Высокая удельная мощность

• Простой монтаж и эксплуатация в ограниченном пространстве

• Функция "клонирования" через BOP-2, IOP, карту SD или USB-разъем

• Safety Integrated (STO)

• Лакированные электронные платы

• Эксплуатация при температуре 60 °C

Схема подключения аналоговых и цифровых входов и выходов преобразователя частоты показана на рисунке 2.7. Источник питания является трехфазная сеть 380 В, 50 Гц, которая подключается через автоматический выключатель. Преобразователь частоты имеет аналоговые и цифровые входы/выходы, которые позволяют подключить элементы управления: кнопки, реле, датчики, потенциометр. Стандартный порт RS 485 служит для связи ПЧ с компьютером.

Для питания используется либо внешний источник напряжения 24 В, или внутренний источник (вход X124).

Через порты X126 и X127 можно подключить PROFIBUS и LAN.

X122 разъем цифровых входов и выходов.

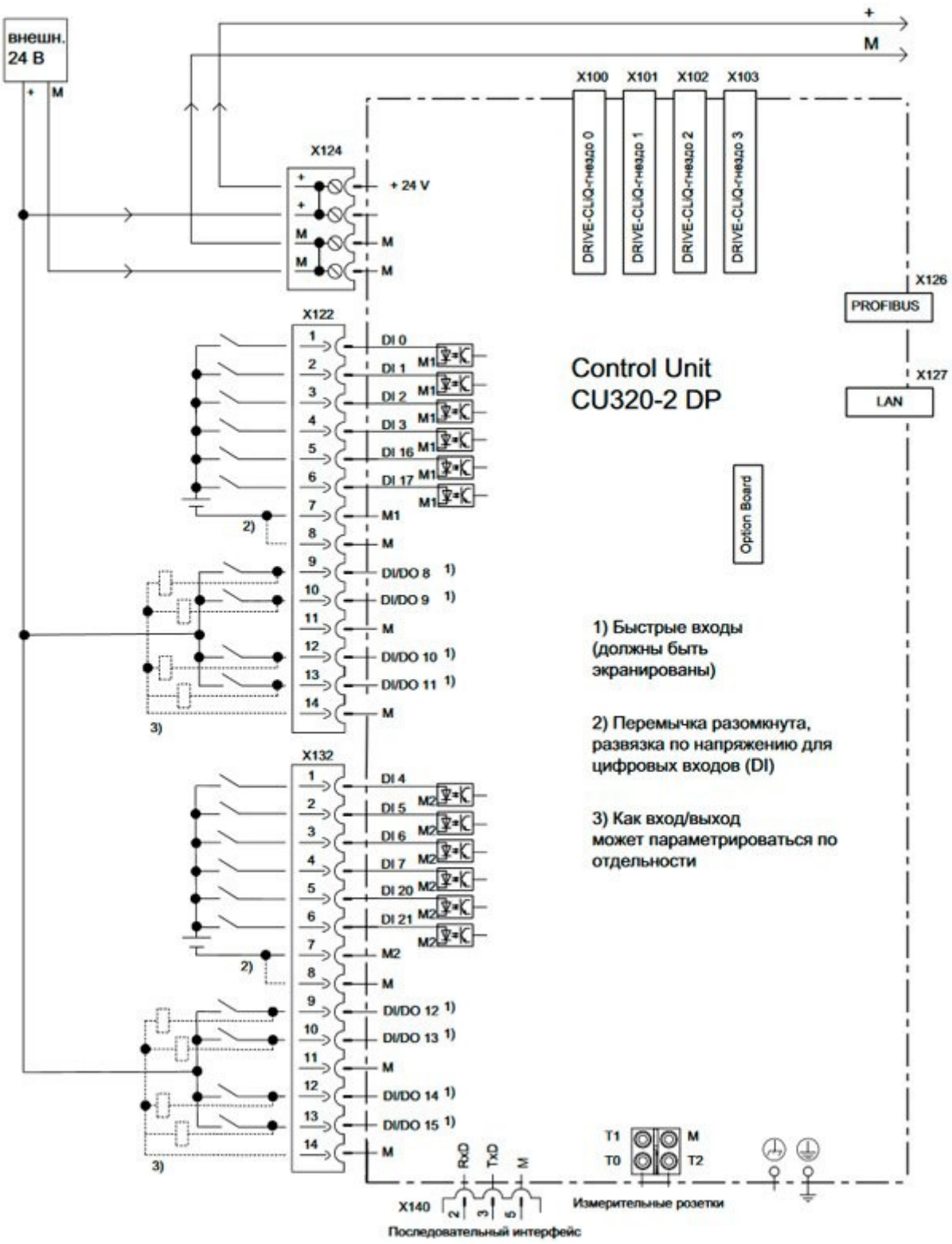


Рисунок 2.3 – Схема подключения преобразователя частоты

2.4 Выбор оборудования и устройств защиты

Для защиты преобразователя частоты выбираем автоматический выключатель серии А3700 с тепловым и электромагнитным расцепителями. Требуемый автоматический выключатель должен удовлетворять следующим условиям:

Номинальное напряжение $U_{нвыкл} \geq U_{нсети}$= 380 В;

Номинальный ток выключателя $I_{нвыкл} \geq I_{1л}$ =10 А

Уставка по току срабатывания

– теплового расцепителя

$I_т \geq 1{,}25I_{1л}$ =1,25*10=12,5 А

Указанным условиям удовлетворяет автоматический выключатель типа ВА88-32 фирмы IEK со следующими номинальными параметрами: $U_{н.выкл}$=380 В, $I_{н.выкл}$=16 А.

В данной схеме электропривода (рис.2.8) переменного тока предохранители установлены для защиты цепи управления. Выбирая предохранители для защиты цепи управления, будем ориентироваться на значения пусковой мощности, потребляемой обмоткой магнитного пускателя, и ее номинальной мощности в режиме удержания. При этом следует отметить, что в каждый момент времени (пуск, торможение, реверс) работает только одна контактная группа.

Iном.в ≥ Iпуск/(1,6÷2,0)

Iном.в=(6,5*8,9)/2=29А

Таким образом, выбираем слаботочные предохранители на номинальное напряжение 380 В серии ПН-2-40, рассчитанные на номинальный ток $I_{ном}$ = 40 А.

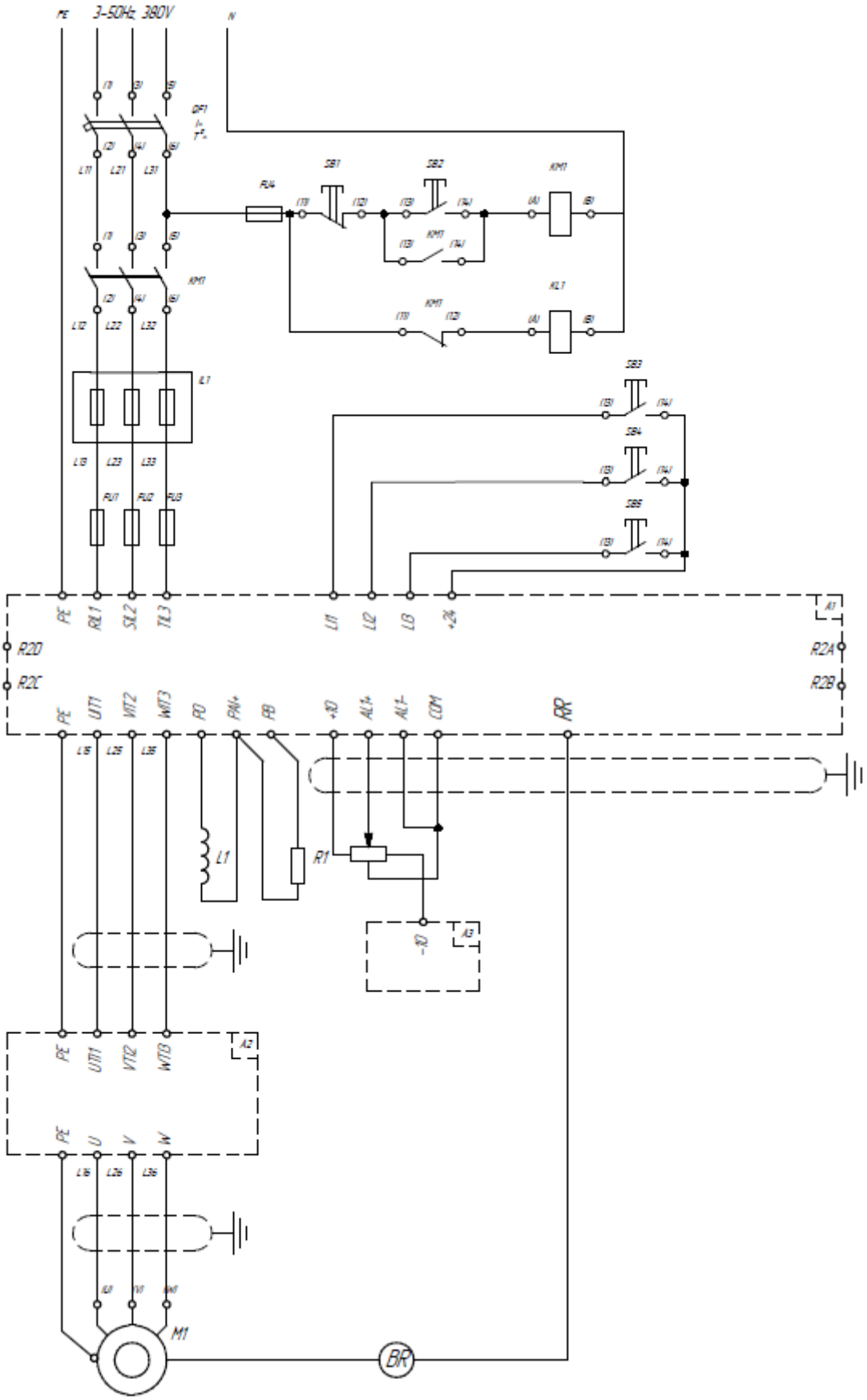


Рисунок 2.4 – Схема электрическая принципиальная

Сетевой дроссель цепи переменного тока применяется для подавления гармоник (гармонических составляющих токов и напряжений) со стороны питающей сети, сводит к минимуму дополнительные тепловыделения, возникающие при работе преобразователя, и вероятность возникновения всевозможных сбоев в работе оборудования, вызываемых нестабильностью питающей сети. Рекомендуется устанавливать, если мощность питающей сети в десятки раз превышает мощность ЧП или при наличии в питающей сети помех от более мощных устройств. Использование сетевого дросселя цепи переменного тока существенно влияет на форму потребляемого преобразователем тока и значительно приближает его к синусоидальной, существенно ослабляет броски напряжения в сети при включении или выключении крупных потребителей, продлевается срок службы конденсаторов промежуточного контура, надежность преобразователя увеличивается в 5 – 7 раз. При использовании сетевого дросселя цепи переменного тока ограничивается скорость нарастания тока, если преобразователь по каким-либо причинам вышел из строя, при этом успевает сработать входной автомат отключения питания, и повреждения оказываются минимальными, и, как следствие, более дешевый ремонт.

Выбираем дроссель серии ISF-55/113-4 с номинальным током 25 А, 380 В, 50 Гц.



Рисунок 2.5 – Дроссель ФС, вид общий

Для питания выбираем провод 2,5 мм^2, медный, серии ВВГн, с длительно допустимым током 29 А.

Программируемый логический контроллер SIMATIC S7-300 - предназначен для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности. Модульная конструкция контроллера S7-300, работа с естественным охлаждением, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, высокое удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения оптимальных решений для построения систем автоматического управления технологическими процессами в различных областях промышленного производства.

В таблице 2.2 приведена спецификация выбранного оборудования.

Таблица 2.2 Спецификация выбранного оборудования

№	Об.	Наименование	Описание	Прим
1	M1	Электродвигатель	МТКН 111-6, 3,5 кВт	
2	A1	Преобразователь частоты	SINAMICS G120, 3,5 кВт	
3	QF1	Автоматический выключатель	ВА88-32, фирмы IEK, 16 А	
4	FU	Предохранитель	ПН-2-40	
5	A2	Дроссель	ISF-55/113-4 с номинальным током 25 А, 380 В, 50 Гц	
6	-	Провод	ВВГнг, 2,5 мм^2	
7	A3	Контроллер	Simatic S7-300	

Использование нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров повышает эффективность применения контроллеров SIMATIC S7-300.

Программируемые контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 имеют модульную конструкцию и состоят из таких элементов:

- Центральные процессоры - Модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от сложности задачи в контроллерах могут быть использованы различные типы центральных процессоров, которые отличаются производительностью, размером памяти, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций, количеством и типом встроенных коммуникационных интерфейсов и т.д.

- Блоки питания - Блоки питания (PS), обеспечивают питание контроллера от сети переменного тока напряжением 120/230 В или от источника постоянного тока напряжением 24/48/60/110 В.

- Сигнальные модули SM - Сигнальные модули (SM), предназначены для ввода и вывода дискретных или аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами.

- Коммуникационные модули - Коммуникационные процессоры (CP) обеспечивают возможность подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface или организации связи по PtP (point to point) интерфейсу.

- Функциональные модули - Функциональные модули (FM), могут самостоятельно решать задачи автоматического регулирования, позиционирования, обработки сигналов. Функциональные модули снабжены встроенным микропроцессором и выполняют возложенные на них функции даже в случае отказа центрального процессора программируемого логического контроллера.

- Интерфейсные модули - Интерфейсные модули (IM), обеспечивают возможность подключения к базовому блоку (стойка с CPU) стоек расширения ввода-вывода. Программируемые контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а также коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам. Все модули работают с естественным охлаждением.



Рисунок 2.6 – Контроллер Simatic S7-300

Программирование ПЛК производится так же с помощью Simatic Manager, обеспечивающий написание программ в трех редакторах:

LAD (Ladder Diagram) — релейные диаграммы. Редактор отображает программу в графическом представлении, похожем на электрическую монтажную схему. Логические схемы позволяют программе имитировать протекание электрического тока от источника напряжения через ряд логических условий на входах, которые активизируют условия на выходах. Источником напряжения выступает шина, находящаяся слева.

Основными элементами являются нормально замкнутые и нормально разомкнутые контакты.

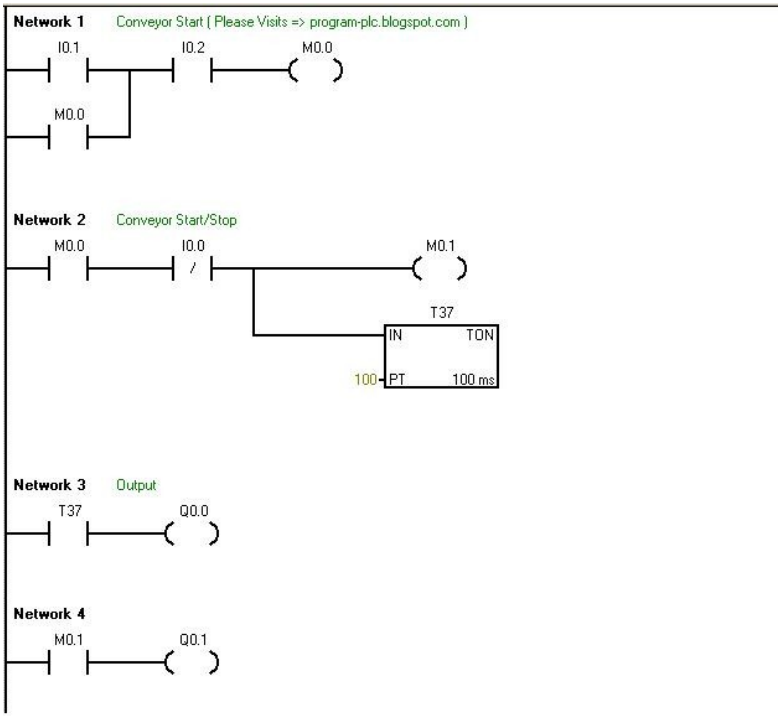


Рис.2.7 – Фрагмент программы

3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Выбор закона регулирования электроприводов. Структурная схема электропривода

В выбранном электроприводе используется векторный закон регулирования.

Структурная схема асинхронного привода с векторным управлением со стабилизацией потокосцепления ротора, предложенная в [1], изображена на рис. 3.1.

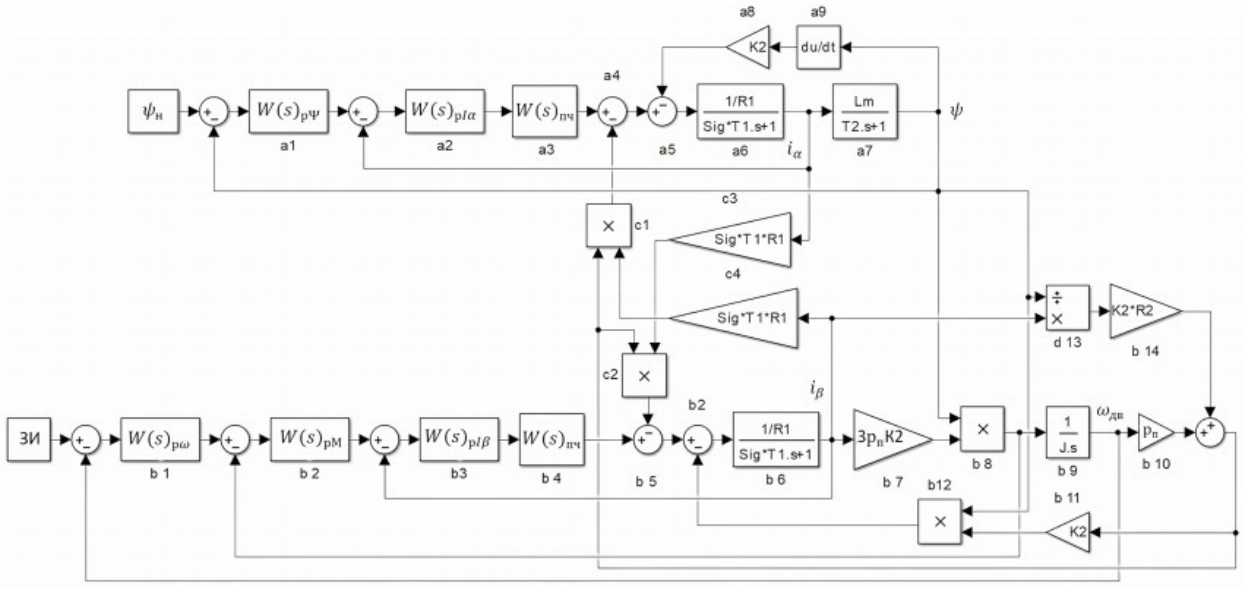


Рисунок 3.1 – Структурная схема асинхронного привода при векторном управлении со стабилизацией потокосцепления ротора в действующих значениях переменных

Система стабилизации потокосцепления, содержащая в прямом канале звенья $W_{p.nm}(s), W_{рла}(s), k_n e^{-\tau s}, \frac{1/R_1}{\sigma T_2 s+1}, \frac{L_m}{T_2 s+1}$, является двухконтурной. Контур тока внутренний, а контур потокосцепления внешний.

Система автоматического регулирования скорости, содержащая в прямом канале звенья $W_{рс}(s), W_{рм}(s), W_{рТ\beta}(s), k_n e^{-\tau s}, \frac{1/R_1}{\sigma T_2 s+1}, 3, \frac{L_m}{Js+1}$ состоит из трех

контуров, где контур тока и контур момента являются внутренними, а контур скорости внешним.

Внутренние контуры тока и момента целесообразно настраивать на оптимум по модулю. Внешний контур потокосцепления также необходимо настраивать на оптимум по модулю. Однако внешний контур скорости рекомендуется настраивать на симметричный оптимум.

Передаточная функция силовой части преобразователя частоты представляет собой звено с чистым запаздыванием, передаточная функция которого

$$W_{ПЧ}(s) = k_{ПЧ} e^{-\tau s}$$

где $k_{пч}$ = 220В — фазное напряжение питающей сети,

$$\tau = \frac{1}{f_{TAK}}$$

где $f_{так}$ — тактовая частота преобразователя.

Используя преобразование Тейлора можно представить в виде:

$$W_{ПЧ} = k_{ПЧ} \cdot \frac{1}{T_{ПЧ} s + 1}$$

Следовательно, силовая часть преобразователя частоты может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с параметрами kпч = 220, $T_{пч}$ =1/$f_{такт}$. Значение $f_{такт}$ указывается в паспорте на преобразователь. Для дальнейших расчётов примем $f_{такт}$= 10 кГц.

Датчик скорости (энкодер) и датчик тока будем считать без инерционными с единичными коэффициентами передачи. Датчик тока встроен в преобразователь частоты, датчик скорости устанавливается на свободный конец ротора двигателя.

Физически датчиков потокосцепления и момента не существует. Текущие значения потокосцепления и момента определяются расчётным путём по модели двигателя. Для дальнейших расчётов виртуальные датчики потокосцепления и момента целесообразно считать безынерционными с коэффициентами передачи равными единице.

В данной структурной схеме задание на скорость формируется задатчиком интенсивности (ЗИ).

Значение номинального потокосцепления определяется по формуле

$$\Psi_{П} = \left(\frac{2 \cdot M_{n} \cdot R_{2}}{3 \cdot P \cdot (\omega_{0} - \omega_{n})} \right)^{0,5}$$

синхронная угловая частота вращения

$$\omega_{0} = \frac{n_{1} \cdot 6.28}{60} = \frac{1000 \cdot 6.28}{60} = 104,7 \; рад/с$$

номинальная угловая частота вращения

$$\omega_{n} = \frac{n_{n} \cdot 6.28}{60} = \frac{865 \cdot 6.28}{60} = 90,5 \; рад/с$$

номинальный момент двигателя

$$M_{H} = \frac{P_{2H}}{\omega_{H}} = \frac{3500}{90,5} = 38,7 \; Нм$$

Следовательно,

$$\Psi_{П} = \left(\frac{2 \cdot 38,7 \cdot 2,38}{3 \cdot 3 \cdot (104,7 - 90,5)} \right)^{0,5} = 1,2 Вб$$

3.2 Синтез регуляторов структурной схемы асинхронного привода с векторным управлением со стабилизацией потокосцепления ротора

3.2.1 Синтез регулятора контура тока

Структурная схема контура тока приведена на рис. 3.2.

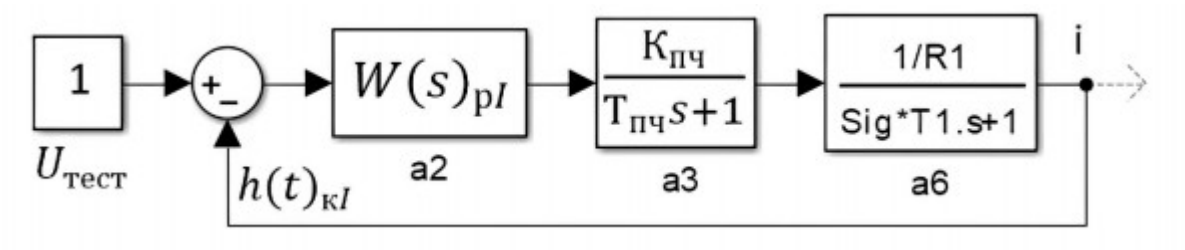


Рисунок 3.2 – Структурная схема контура тока

В связи с тем, что контур тока внутренний, то его настраивают на оптимум по модулю. Так как в данном контуре в качестве неизменяемой его части присутствуют два последовательно включённых апериодических звена, следует использовать ПИ — регулятор (рис. 3.3).

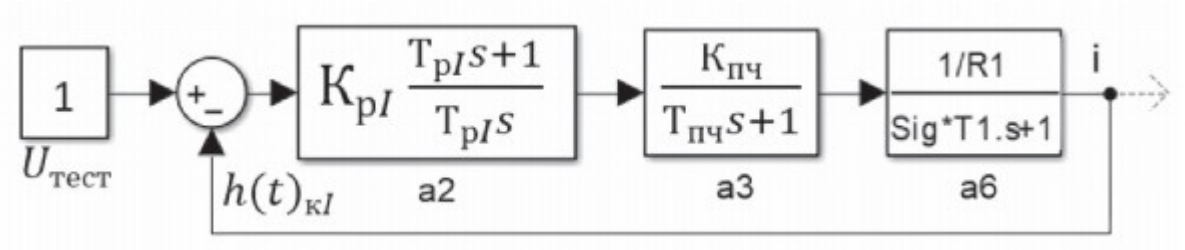


Рисунок 3.3 – Структурная схема контура тока со структурой регулятора, обеспечивающей настройку на оптимум по модулю

Постоянная времени регулятора определяется по формуле:

$$T_{рег1} = Sig \cdot T_1 = 0,096 \cdot 0,1757 = 0,0168\,c$$

Динамический коэффициент усиления определяется по формуле:

$$K_{рег1} = \frac{sig \cdot T_1}{2 \cdot T_{ПЧ} \cdot K_{ПЧ} \cdot \frac{1}{R_1}} = \frac{0,0168}{2 \cdot 0.0001 \cdot 220 \cdot 1/1,4} = 0.536$$

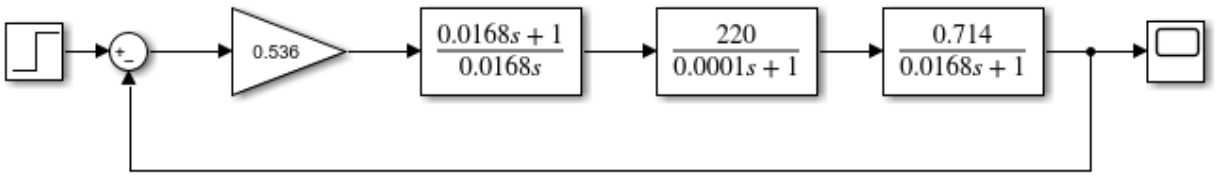


Рисунок 3.4 - Структурная схема контура тока, настроенного на оптимум по модулю

Для оценки качества настройки контура на рис. 3.5 изображена его переходная функция.

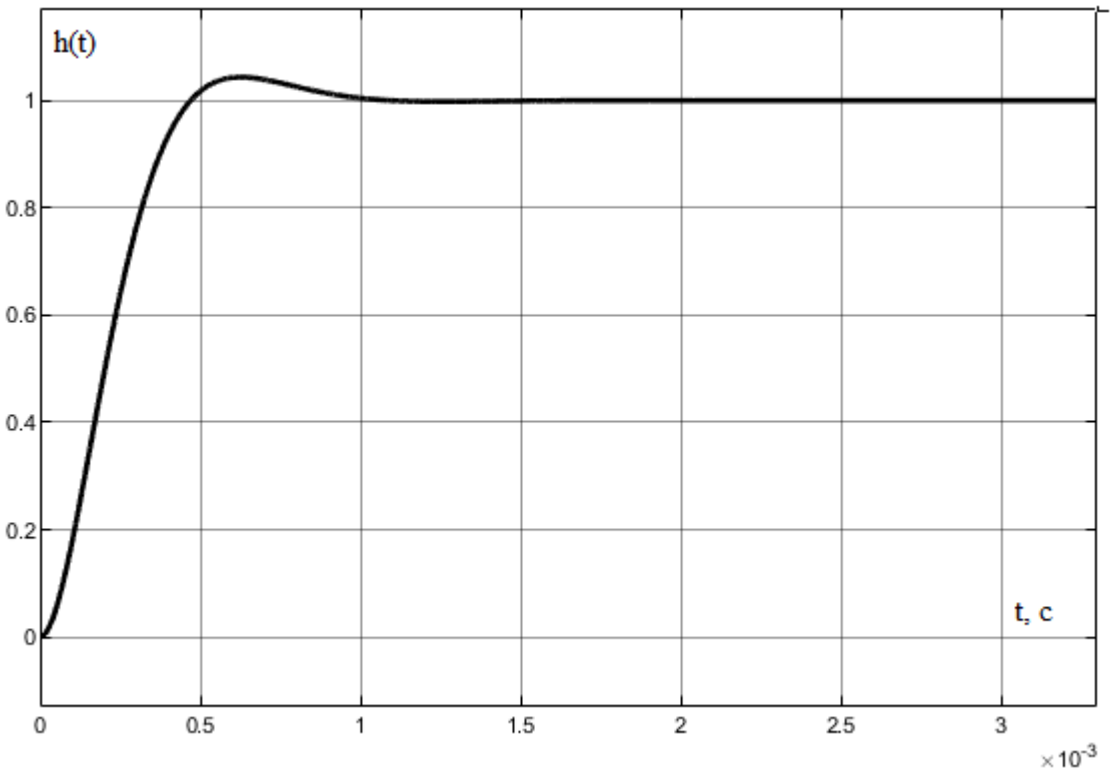


Рисунок 3.5 - Переходная характеристика контура тока

Анализ переходной функции контура тока показывает его точную настройку на оптимум по модулю.

3.2.2 Синтез регулятора контура стабилизации потокосцепления ротора

Структурная схема контура потокосцепления с внутренним контуром тока представлена на рис.3.6. Обратной связью a8, a8 пренебрегаем.

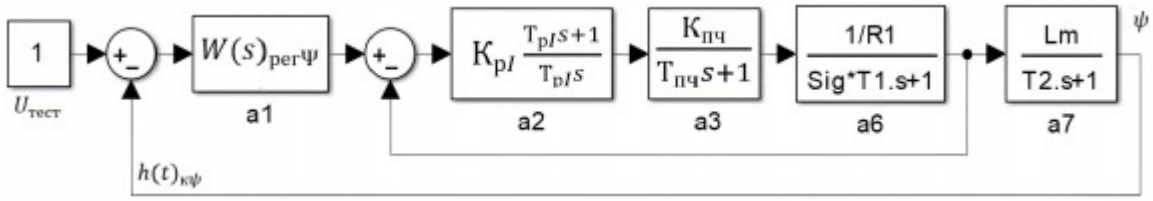


Рисунок 3.6 - Структурная схема контура потокосцепления

Согласно существующим рекомендациям, настраивать контур стабилизации потокосцепления необходимо на оптимум по модулю.

Стоит отметить, что внутренний контур тока настроен на оптимум по модулю, его передаточная функция является апериодическим звеном второго порядка, которую можно заменить на апериодическое звено первого порядка с постоянной времени, равной двум малым постоянным времени контура тока:

$$W_{Т.экв} = \frac{1}{2 \cdot T_{ПЧ} \cdot s + 1}$$

Неизменяемая часть контура потокосцепления после принятых допущениях представляет собой два последовательно включенных апериодических звена первого порядка (рис. 3.7). Следовательно, необходимо использовать пропорционально-интегральный регулятор.

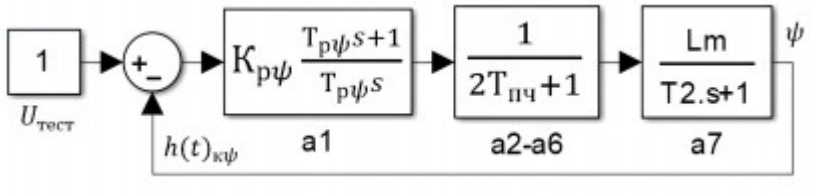


Рисунок 3.7 - Структурная схема упрощённого контура потокосцепления

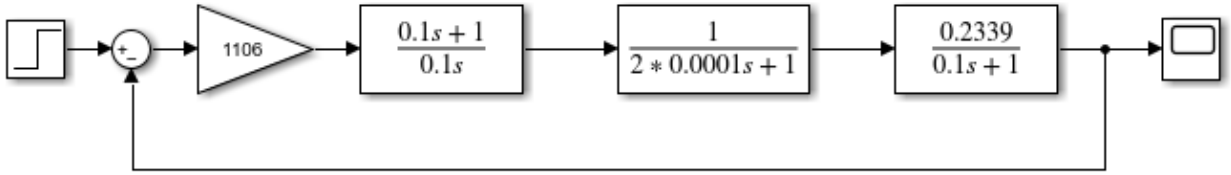
Постоянная времени регулятора:

$$T_{р.Ψ} = T_2 = 0{,}1c$$

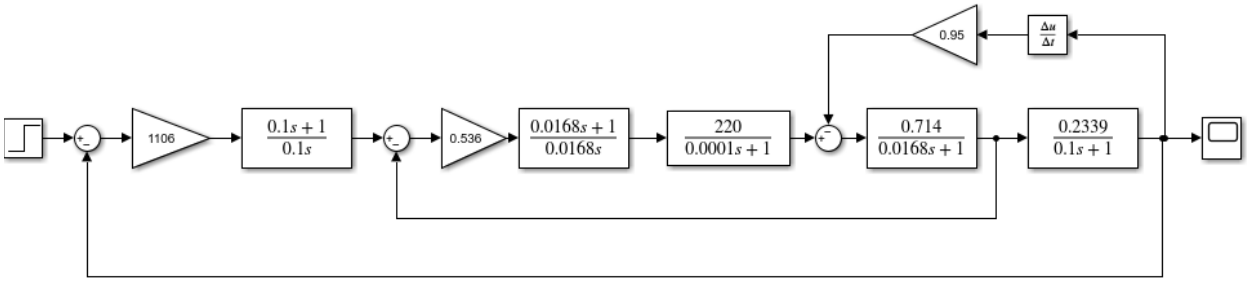
динамический коэффициент усиления:

$$K_{рΨ} = \frac{T_2}{2 \cdot (2 \cdot T_{ПР}) \cdot L_m} = \frac{0.1}{2 \cdot (2 \cdot 0.001) \cdot 0.2339} = 1106$$

Для обеспечения наглядности разницы характеристик упрощённого и реального контуров потокосцепления их структурные схемы изображены на рис. 3.8.



а)



б)

Рисунок 3.8 - Структурные схемы контуров потокосцепления с рассчитанными параметрами: а) упрощенная, б) реальная

Переходные функции, изображённых на рис. 3.8 контуров, представлены на рис. 3.9.

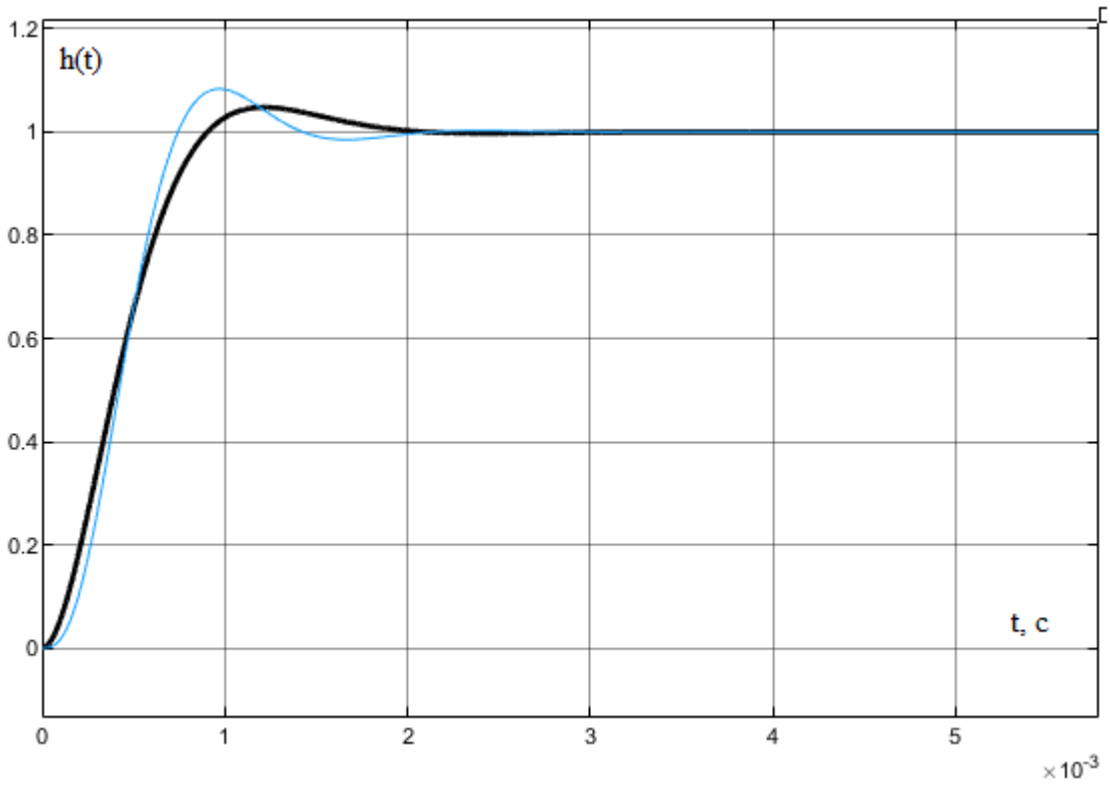


Рисунок 3.9 Переходные характеристики контура потокосцепления, черная – упрощённого, синяя – реального

Анализ этих характеристик показывает, что перерегулирование и время первого согласования характеристики реального контура отличаются от значений, характерных для идеальной настройки на оптимум по модулю, но контур быстродействующий и устойчивый

3.2.3 Синтез регулятора контура момента

Структурная схема реального контура момента, выделенная из структурной схемы, приведена на рис. 3.10.

Контур момента является внутренним по отношению к внешнему контуру скорости и внешним по отношению к контуру тока. Следовательно, контур момента необходимо настраивать на оптимум по модулю. Учитывая замену реального контура тока апериодическим звеном первого порядка, регулятор момента должен быть интегральным.

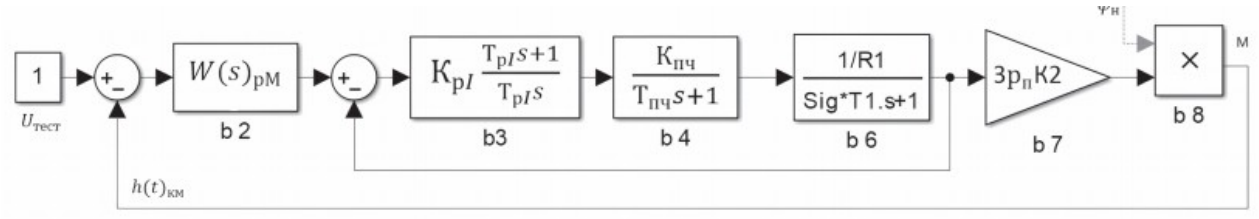


Рисунок3.10 - Структурная схема реального контура момента

Постоянная времени регулятора:

$$T_{рм} = 2 \cdot T_{\mu} \cdot 3 \cdot p_{п} \cdot K_2 \cdot \Psi_{Н} = 2 \cdot 0,0001 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0,951 \cdot 1,2 = 4,1 \cdot 10^{-3}\, c$$

На рис. 3.10 изображен упрощённый контур момента, в котором контур тока представлен звеном с передаточной функцией апериодического звена первого порядка с постоянной времени $Т_{\mu}$.

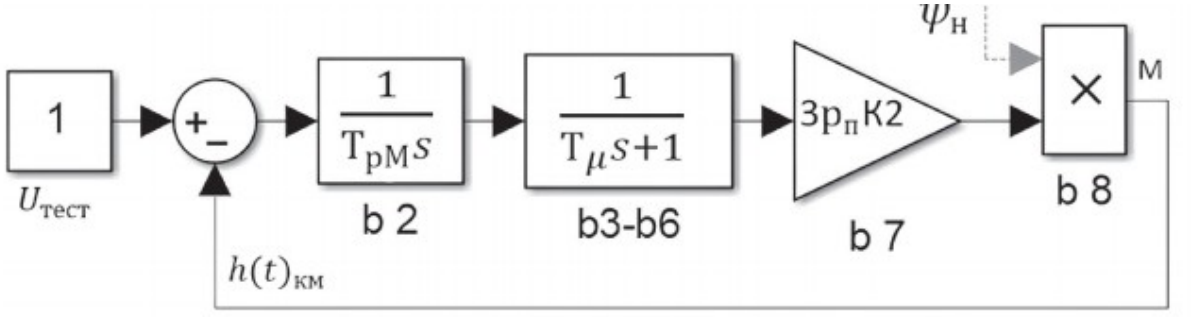
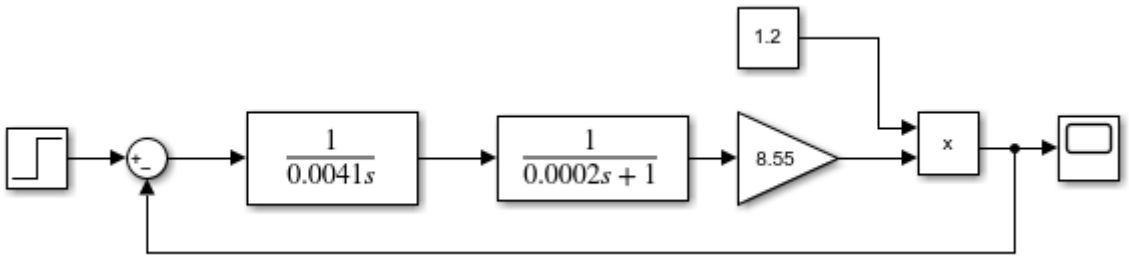
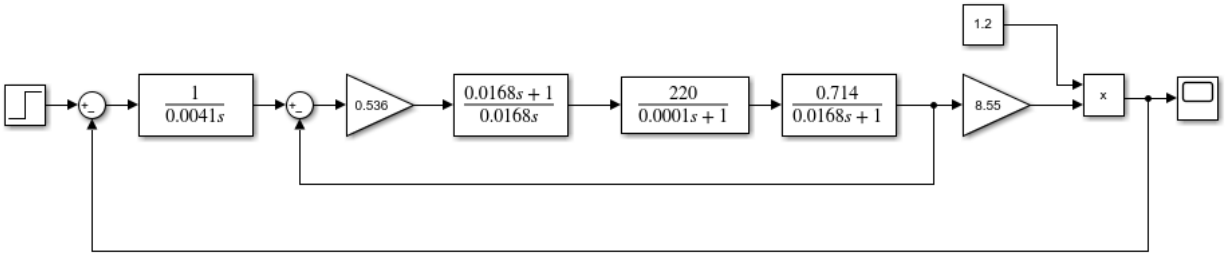


Рисунок 3.10 - Структурная схема упрощённого контура момента

Для упрощения анализа на рис. 3.11 представлены структурные схемы упрощённого и реального контуров момента с рассчитанными параметрами.



а)



б)

Рисунок 3.11 - Структурная схема контура момента с рассчитанными параметрами а) упрощённая, б) реальная

Для анализа уровня отличий переходных функций упрощённого и реального контуров момента они представлены на рис. 3.12.

Анализ графиков переходных функций реального и упрощённого контуров момента показывает, что переходная функция реального контура момента не соответствует переходной функции идеально настроенного на оптимум по модулю контура. Однако реальный контур момента устойчивый и быстродействующий.

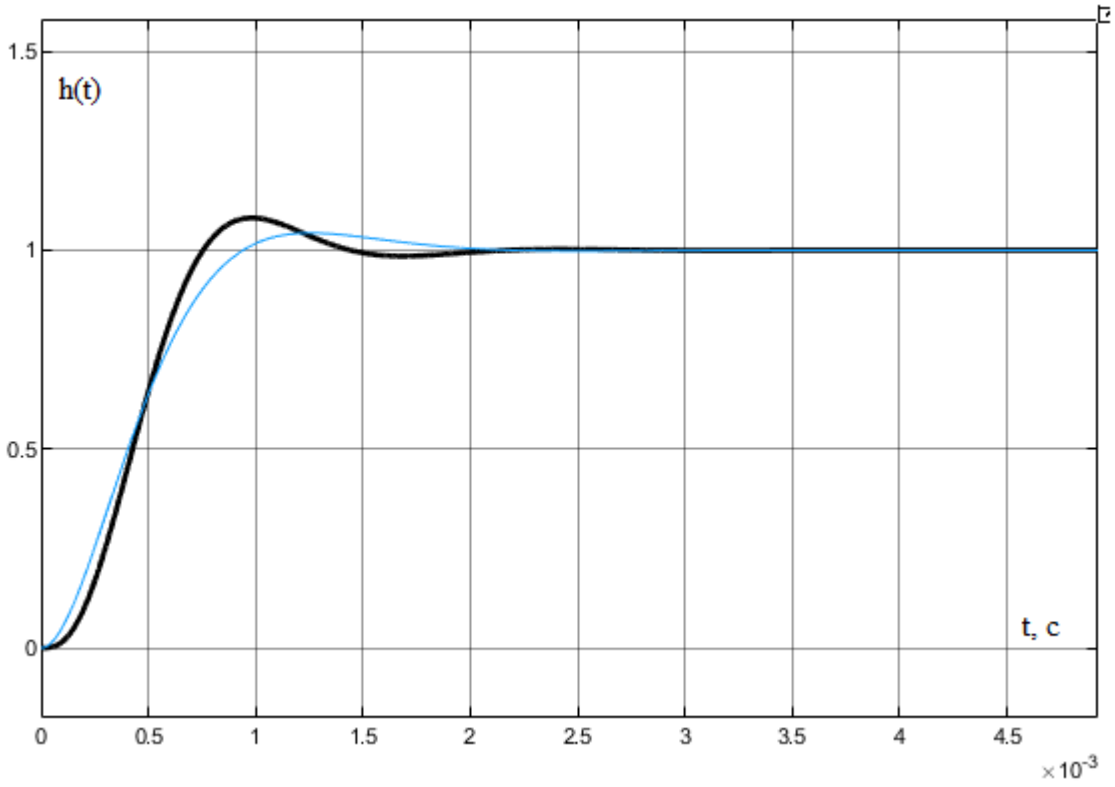


Рисунок 3.12 – Переходные функции реального контура момента-черная, и упрощенного - синяя линия

3.2.4 Синтез регулятора контура скорости

Структурная схема реального контура скорости при замене контура тока апериодическим звеном второго порядка приведена на рис.3.13.

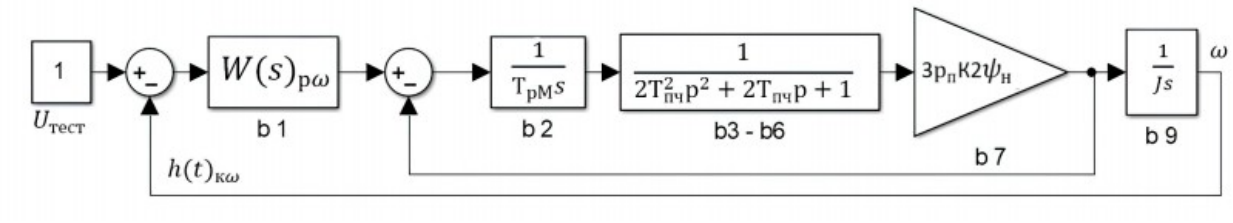


Рисунок 3.13 - Структурная схема реального контура скорости

Контур скорости является внешним контуром, поэтому его целесообразно настраивать на симметричный оптимум. Это позволяет при возникновении возмущающего воздействия по моменту исключить ошибку по скорости, то есть сделать ее равной нулю.

Внутренний контур момента заменяется на апериодическое звено первого порядка с постоянной времени Tμ2 = 4Tпч. В таком случае объект управления в контуре скорости будет выглядеть как последовательно соединенные интегральное и апериодическое звено первого порядка. Структурная схема упрощённого контура скорости представлена на рис. 3.14.

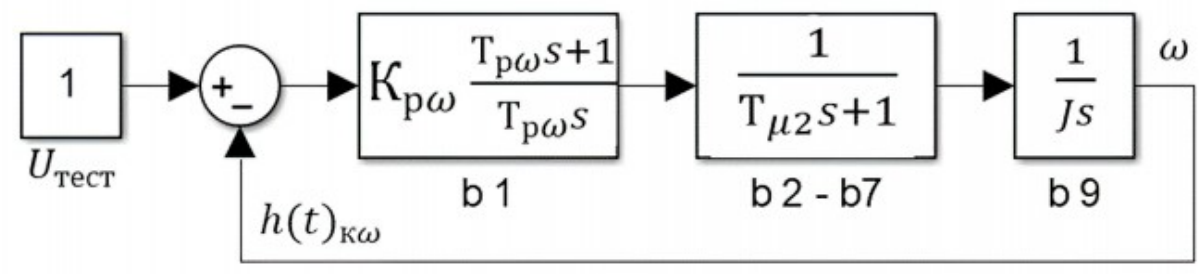


Рисунок 3.14 – Структурная схема упрощённого контура скорости

В качестве регулятора следует использовать ПИ — регулятор.

Динамический коэффициент усиления рассчитывается по формуле

$$K_{регω} = \frac{J}{2 \cdot 4 \cdot T_{ПР} \cdot K_{Дω}} = \frac{1.621}{2 \cdot 0,0004 \cdot 1} = 2026$$

Постоянная времени регулятора:

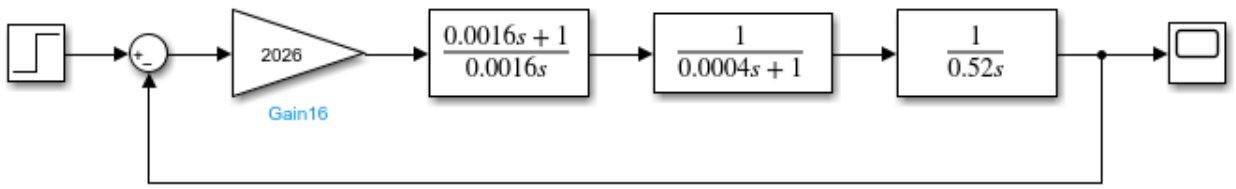
$$T_{регω} = 4 \cdot 4 \cdot T_{регω} = 4 \cdot 4 \cdot 0.0001 = 0.0016$$

Структурные схемы упрощённого и реального контуров скорости представлены на рис.3.15.

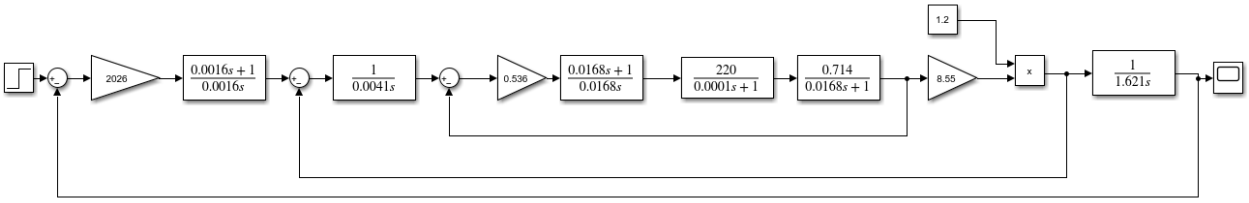
Для определения уровня идентичности упрощённого и реального контуров скорости на рис. 3.16 приведены их переходные функции.

Изображённые на рис. 3.17 переходные функции имеют практически равные быстродействия и перерегулирования, поэтому можно предположить, что их взаимная замена в более сложных структурных схемах не принесёт значительных ошибок в результатах анализа.

При достаточно высокой точности стабилизации потокосцепления структурную схему, можно заменить на структурную схему, изображенную на рис. 3.15 (структурная схема аналогична структурной схеме САР скорости с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением).



а)



б)

Рисунок 3.15 - Структурная схема контура скорости с рассчитанными параметрами а) упрощённая, б) реальная

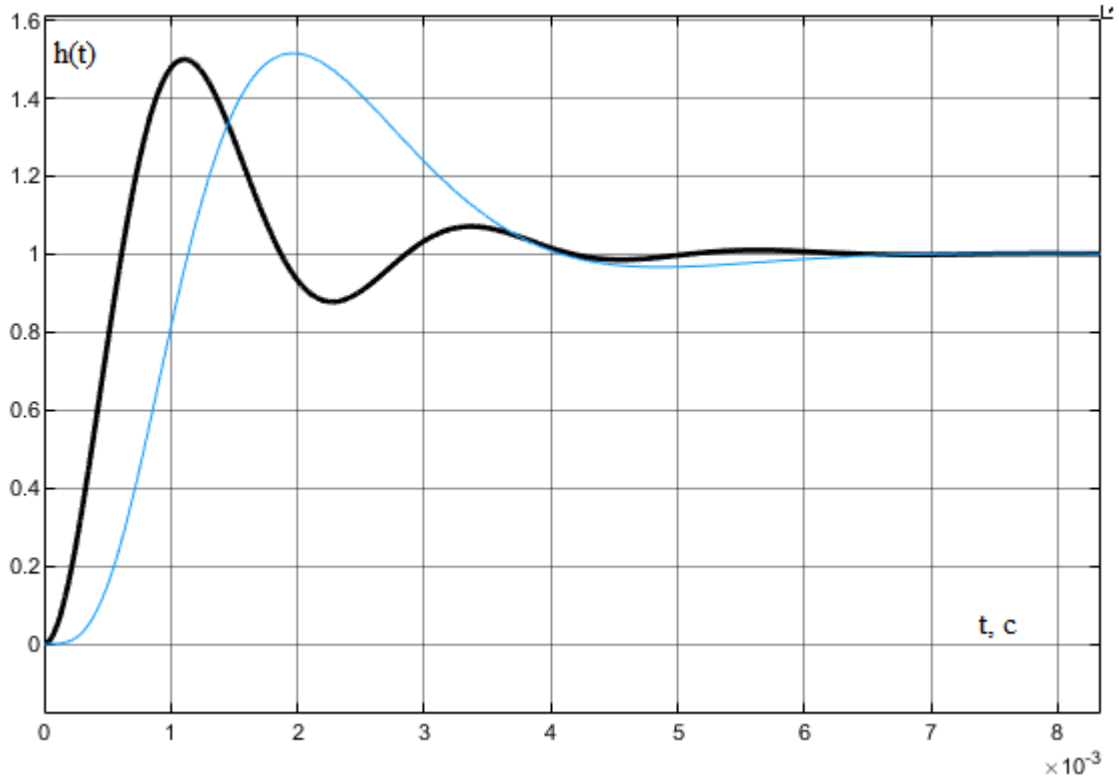


Рисунок 3.16 - Переходная функция реального контура скорости – синяя, упрощённого контура – черная

3.3 Анализ структурной схемы S-образного задатчика интенсивности

В некоторых случаях, кроме обеспечения заданного уровня выходной координаты, требуется контролируемое ограничение не только первой производной (ускорения) функции изменения выходной координаты САР, но и её производной второго порядка (рывка). Для этих целей используют более

сложные структуры задатчиков интенсивности, так называемые S-образные задатчики интенсивности.

На рисунке 3.17 представлена структурная схема одного из таких задатчиков интенсивности. Сигналами управления этим ЗИ являются постоянные значения величин h и b.

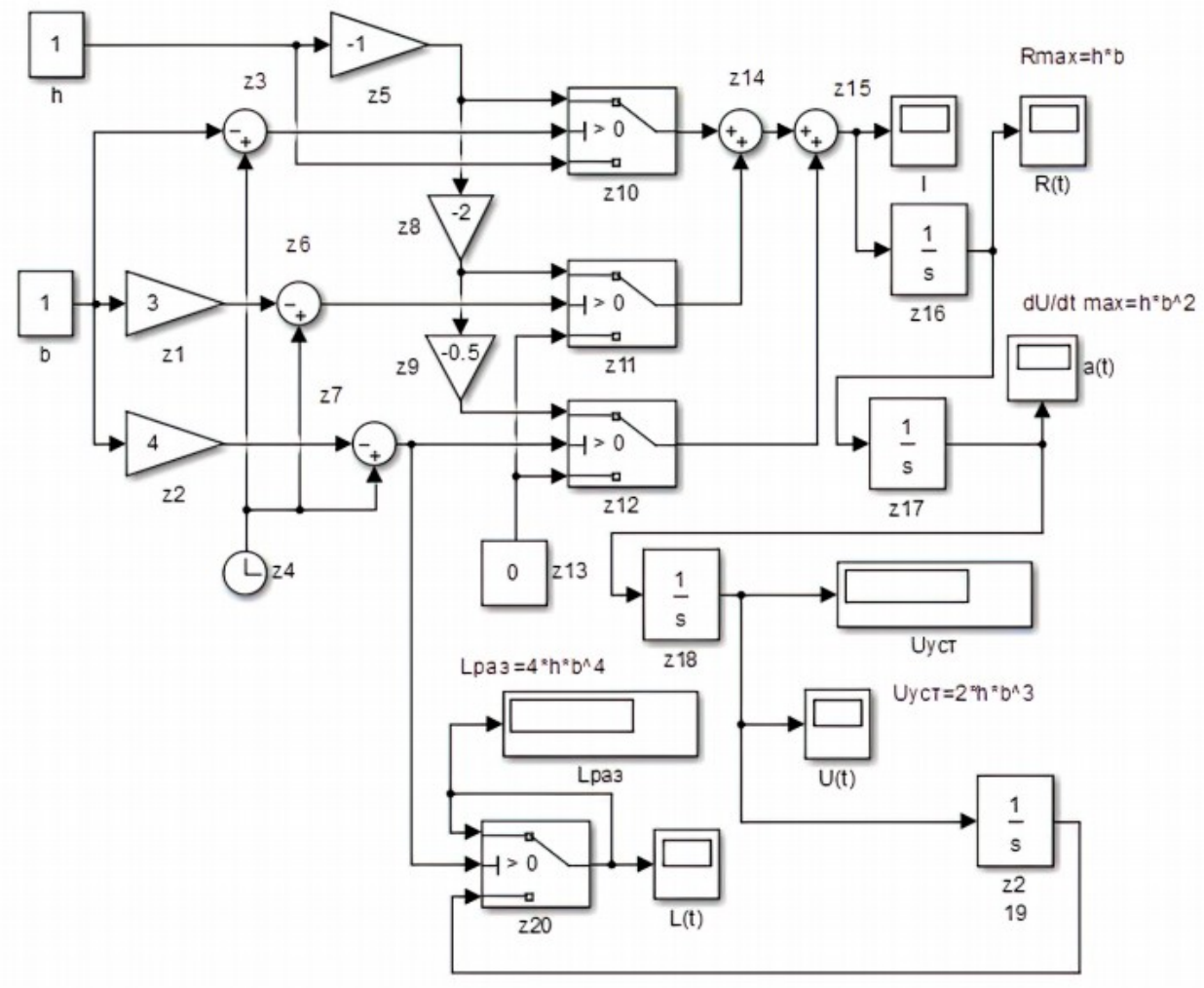


Рисунок 3.17 – Структурная схема S – образного задатчика интенсивности

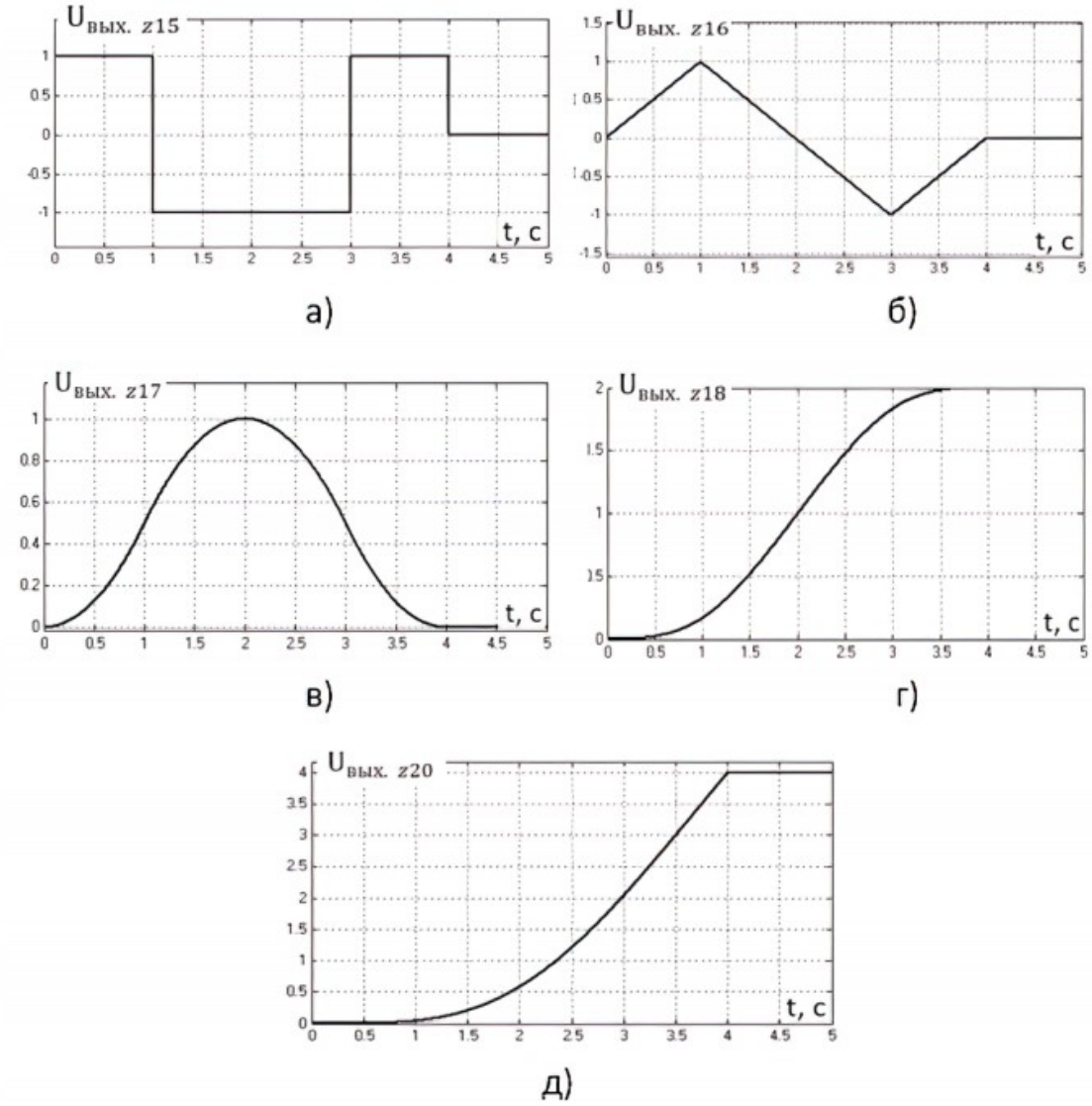


Рисунок 3.18 – Временные функции

На выходе элемента z15 формируется ступенчатый сигнал, изображённый на рис. 3.18а. Последовательное интегрирование этого сигнала дает функции, изображённые на рис. 3.18б, 3.18в, 3.18г и 3.18д. Если принять сигнал, график которого изображён на рис. 3.18г, за сигнал задания на систему автоматического регулирования скорости, то ускорение (величина, пропорциональная динамическому моменту) будет соответствовать функции, изображённой на рис. 3.18в.

Анализ этого графика показывает, что в начале и конце разгона ускорение будет изменяться плавно, т. е. динамические нагрузки на элементы механической части электропривода будут носить плавно изменяющийся

характер. При таких динамических моментах долговечность механизмов будет значительно больше, чем при ступенчатом изменении динамического момента. На рис.3.18б изображён сигнал пропорциональный рывку, а на рис. 3.18д изображён сигнал, пропорциональный пройденному пути за время разгона.

3.4 Разработка математической модели электропривода

На рис. 3.20 и 3.21 в одних осях представлены результаты моделирования по структурным схемам, приведённым на рис. 3.19.

Все три графика практически слились воедино, что свидетельствует, во-первых, о практической идентичности двух рассматриваемых моделей, во-вторых, — о высоком быстродействии контуров скорости этих моделей (практически нет рассогласования между графиком сигнала задания и графиком скорости).

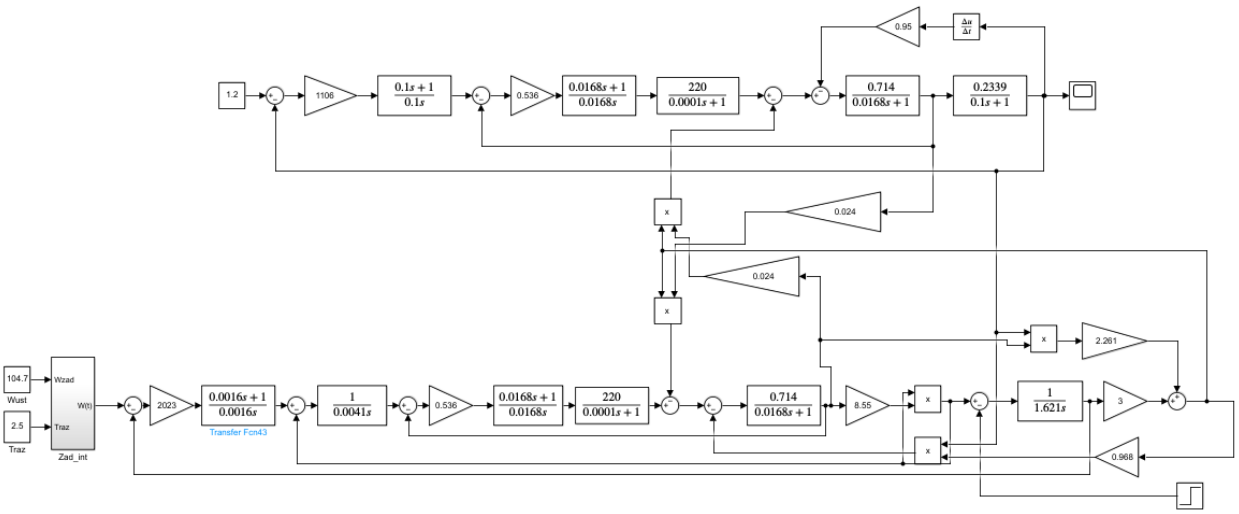


Рисунок 3.19 - Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением со стабилизацией потокосцепления ротора

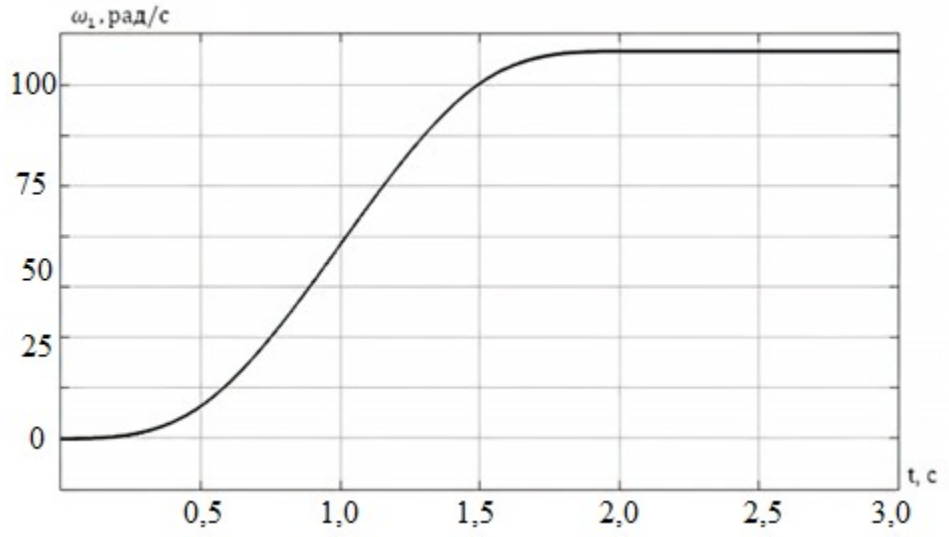


Рисунок 3.20 - Графики скорости электропривода по модели векторного привода со стабилизацией потокосцепления ротора

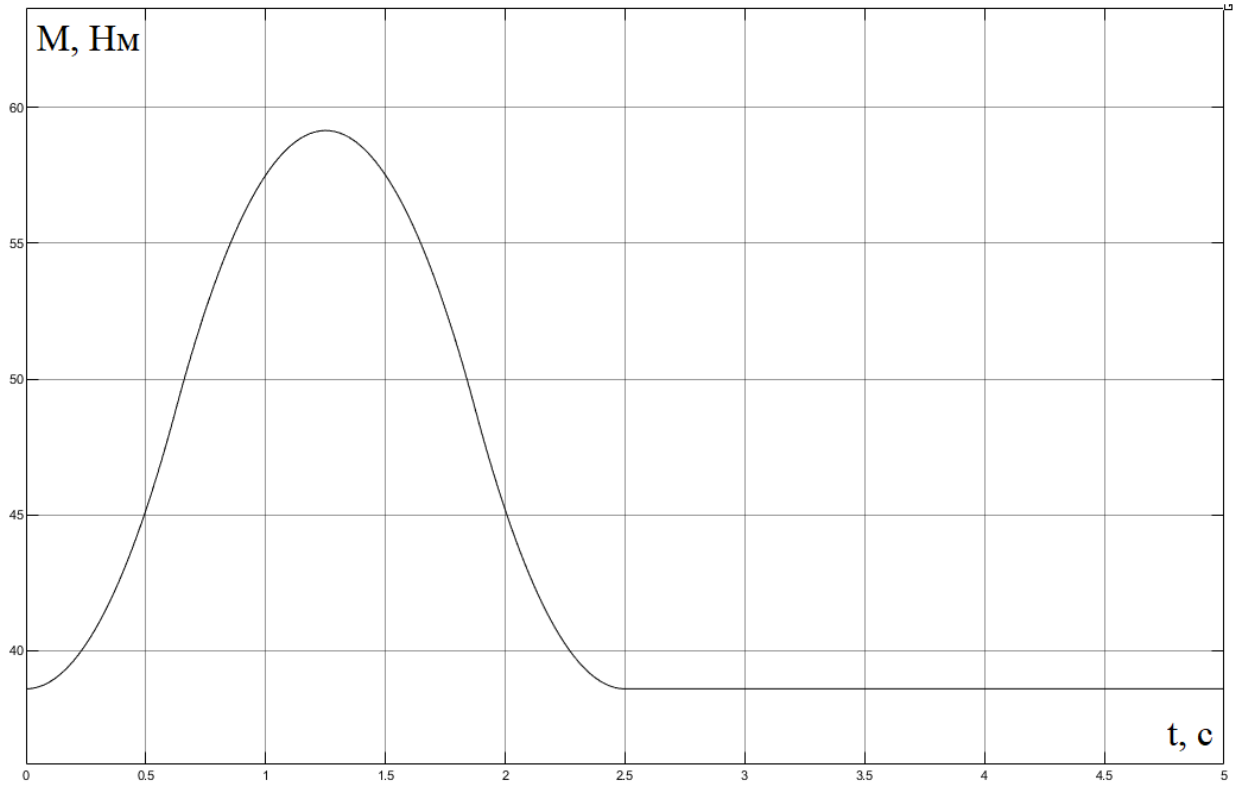


Рисунок 3.21 - Графики развиваемого двигателем момента, полученные по модели векторного привода со стабилизацией потокосцепления ротора

Анализ графиков, представленных на рис. 3.20 и 3.21, позволяет сделать вывод, что на отрезке времени от 0 до 2,5 секунд промоделирован

динамический момент, развиваемый двигателем при пуске (момент сопротивления механизма при этом задаётся равным нулю). Отрезок времени от 3 и далее соответствует работе привода в установившемся режиме под нагрузкой.

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Исходные данные для расчета и капитальные затраты по вариантам Смета на приобретение нового оборудования представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Стоимость электрооборудования

№	Наименование оборудования	Колич	Стоимост
1	Шкаф ввода и привода перемещ. моста в составе: - шкаф Rittal с монтажными панелями — 1 шт. - преобразователь на 11кВт - 1 шт. - предохранители, контакторы - элементы силового интерфейса (контакторы, автоматические выключатели, предохранители, реле) - интерфейс шкафа (источники питания,	1	437 388
2	Шкаф привода главного подъема, в составе: - шкаф Rittal с монтажными панелями - 1 шт. - преобразователь на 75кВт - 1шт. - предохранители, контакторы - элементы силового интерфейса (контакторы, автоматические выключатели, предохранители, реле) - интерфейс шкафа (источники питания,	1	497 840
3	Шкаф привода перемещ. тележки + рекуператор, в составе: - шкаф Rittal с монтажными панелями - 1 шт. - преобразователь на 3.3кВт, - 1шт. - модуль рекуперации, - 1шт. - предохранители, контакторы - элементы силового интерфейса (контакторы, автоматические выключатели, предохранители, реле)	1	533 400

4	Оборудование кабины в составе: - кондиционер - 1 шт. - пульт-кресло с аппаратами управления - 1шт. - освещение кабины - сигнальная арматура - сенсорная панель оператора. PLC Twido в составе: - центральный процессор - модули ввода/вывода;	1	853 440
5.	Комплект радиоуправления в составе: - пульт с аппаратами управления -1 шт - зарядное устройство; - шкаф с контроллером (дешифратором);	1	337 820
6	Общекрановое оборудование, в составе: - эл. двиг. главного подъема - 75 кВт. со встроенными вентиляторами, энкодером -1 шт. - эл. двиг. перемещения тележки - 4 кВт. со встроенным вентилятором и тормозом -1 шт. - эл. двиг. перемещ. моста - 11 кВт. со встроенными вентиляторами и тормозами - 1 шт. -тормоз на привод гл. подъема ТКГ-300, 2шт. -тормоз на привод вспом. подъема ТКГ-400, 2шт. - ограничитель грузоподъемности с функцией регистратора параметров (ОНК); - конечные выключатели для механизмов подъема - конечные выключатели для механизмов перемещения - ультразвуковые датчики (система противостолкновения кранов) - освещение подкрановое - освещение аварийное - розетки по крану	1	3 733 800
7	Неучтенные материалы, запасные части 15% от стоимости оборудования. Кабель.	1	640 080

8	Проектные работы, промышленная экспертиза РД: электроприводы механизмов крана, система управления электроприводами	1	533 400
9	Наладка и ввод в эксплуатацию Электрооборудование крана	1	853 440
Σ	8 420 608		

Капитальные вложения состоят из затрат на приобретение оборудования, материалов, комплектующих, транспортных расходов, затрат на установку и монтаж оборудования и комплектующих, а также расходов, связанных с внедрением мероприятия - демонтаж старого оборудования, переобучение персонала и т.д.

Ликвидационная стоимость демонтированного оборудования (реализация на сторону или по цене лома) из суммы капитальных вложений вычитается. В расчётах примем, что затраты на демонтаж оборудования равны ликвидационной стоимости.

Итого затраты:

$З_{доп}$ =8420608 руб.

Определение годового экономического эффекта Экономический эффект может быть достигнут в результате:

1) снижения эксплуатационных издержек;
2) повышения объема выпуска продукции;
3) повышения качества продукции.

Для нахождения экономического эффекта от снижения эксплуатационных издержек рассчитываются наиболее существенно изменяющиеся в результате внедрения мероприятия статьи затрат на выпуск продукции. Это могут быть следующие статьи:

- затраты на энергетические ресурсы;
- амортизационные отчисления;
- затраты на ремонт.

Годовые эксплуатационные издержки определяются отдельно для каждого из двух вариантов - до внедрения мероприятия и после внедрения, затем сравниваются. Их разница и составляет годовой экономический эффект от снижения эксплуатационных издержек.

Затраты на энергетические ресурсы

1) Расчет экономии за счет уменьшения потребления электроэнергии электрической части мостового крана.

По паспортным данным системы ПЧ-АД потребляют: Мощность двигателей после модернизации:

Итого: $Р_{пм}$=241.5

Мощность двигателей до модернизации:

Итого: $Р_{дм}$=309 кВт

Затраты на потребленную электроэнергию за год составят:

Для системы АД с фазным ротором и блоком сопротивлений до модернизации

$Э_{ЭС1}$ = 309 • 2 • 2070 • 3,504 = 4482527,04 руб.,

где 2070 - годовой сменный фонд рабочего времени, час;

2 - число смен; 3,504 кВт/час - стоимость электроэнергии для предприятий. Для системы ПЧ-АД после модернизации

$Э_{ЭС2}$ = 241,5 • 2 • 2070 • 3,504 = 3503334,24 руб.

$ΔЭ_{сс} = Э_{ЭС1} — Э_{ЭС2}$,

$ΔЭ_{СС}$ = 4482527,04 - 3503334,24= 979192,8 руб.

2) Расчет экономии за счет уменьшения потребляемой электроэнергии электрооборудования (без системы электропривода).

Суммарная потребляемая мощность электрооборудования крана: до модернизации Р1=30кВт; после модернизации Р2=22кВт. Затраты составят: до модернизации

$Э_{С01}$ = 30 • 2 • 2070 • 3,504 = 435196,8 руб.,

после модернизации

$Э_{С02}$ = 22 • 2 • 2070 • 3,504 = 319144,31 руб. $\Delta Э_{С0}$ =435196,8 -319144,31= 116052,48 руб.

3) Расчет экономии за счет повышения КПД крана.

Величина потерь составит:

до модернизации

$\Delta Э_{01} = Э_{С01} — (Э_{С01} • \eta 1)$,

$\Delta Э_{01}$ =435196,8 -(435196,8 •0,69) = 134911 руб; после модернизации

$\Delta Э_{02}$ =319144,31-(319144,31•0,93) = 22340,1 руб.

Снижение потерь составит:

$\Delta Пот = \Delta Э_{01} - \Delta Э_{02}$

$\Delta Пот$ = 134911 -22340,1 = 112570,89 руб.

Итого:

$Э_{\Sigma} = \Delta Э_{СС} + \Delta Э_{со} + \Delta Пот$,

$Э_{\Sigma}$ = 979192,8 + 116052,48 + 112570,89 = 1207816,17 руб.

Амортизационные отчисления Амортизационные отчисления для данной системы:

$$З_{АМОР} = \frac{З_{ДОП}}{Н_А}$$

где $Н_А$=4%- норма амортизации, при сроке эксплуатации 25 лет.

$$З_{АМОР} \frac{8420608\text{-}336824,32}{25} = 323351,34\ руб$$

Стоимость ремонта определяется по следующим показателям: Величина

$$Срем = (Нм•Rм+Нэ•Rэ)$$

где Нм , Нэ - среднегодовые нормативы на единицу ремонтной сложности механической и электротехнической частей крана, руб.

Rм , Rэ - категория сложности ремонта крана (механической, электротехнической части).

$Н_{Э1}$ = 6,41 т. руб.; $Н_{Э2}$ =5,06 т. руб.; $R_{Э1}$ = 8; $R_{Э2}$ = 5; где,

$Н_{Э1}$ - среднегодовые нормативы на единицу ремонтной сложности электротехнической части до модернизации;

$Н_{Э2}$ - среднегодовые нормативы на единицу ремонтной сложности электротехнической части после модернизации;

$R_{Э1}$ - категория сложности ремонта крана электротехнической части до модернизации;

$R_{Э2}$ - категория сложности ремонта крана электротехнической части после модернизации.

Так как механическую часть мы не изменяем, то и норматив и сложность работ механической части остаётся неизменным.

$\Delta C_{РЕМ} = Н_{Э1} \cdot R_{Э1} - Н_{Э2} \cdot R_{Э2}$

$\Delta C_{РЕМ} = 6,41 \cdot 8 - 5,06 \cdot 5 = 25,98$ т.р.

Модернизация станка позволит нам изготавливать технологически более сложную и точную продукцию, что ведёт к увеличению производительности крана.

По данным специалистов предприятия рост объёма производства на данном участке, где заработал кран, составил 48%. Тогда выручка до модернизации 1560 т.р., после - 2309 т.р.

По данным специалистов предприятия, рентабельность до модернизации составляла 9%, после - 22%.

$П_1 = 1560 \cdot 0,09 = 140$ т.р. $П_2 = 2309 \cdot 0,22 = 507$ т.р.

$\Delta П = 507 - 140 = 367$ т.р. где ,

П1- прибыль до модернизации,

$П_2$ - прибыль после модернизации, $\Delta П$ - прирост прибыли.

Снижение заработной платы основных рабочих

До модернизации работали: двое основных рабочих и один обслуживающий инженер по наладке и испытаниям.

$ЗП_С = С_ч \cdot к_{дп} \cdot к_{пр} \cdot к_{соц} \cdot n_р \cdot F_d$,где

$ЗП_С$- заработная плата рабочего до модернизации;

$С_ч$= 109,24. - часовая ставка рабочего 4-го разряда;

$к_{дп}$=1,2 - коэффициент дополнительных выплат;

$к_{пр}$=1,1 - премии;

$к_{соц}$=1,34 - коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды;

$n_р$=2 - количество рабочих;

F_d=1860 ч. - действительный годовой фонд рабочего времени (по нормативно-справочному материалу).

$ЗП_С$ = 109,24 • 1,2 • 1,1 • 1,34 • 2 • 1860 = 718792,2 руб.

ЗПи= Сч • $к_{дп}$ • $к_{пр}$ • $к_{соц}$ • $к_{об,}$ где

$С_ч$=150 р. - часовая ставка инженера;

$к_{дп}$= 1,2 - коэффициент дополнительных выплат;

$к_{пр}$=1,1 - премии;

$к_{соц}$=1,34 - коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды; F_d=1860 ч. - действительный годовой фонд рабочего времени (по нормативно-справочному материалу);

$к_{об}$=0,2 - коэффициент обслуживания.

$ЗП_И$ =150•1,2•1,1 • 1,34 • 1860 • 0,2 = 98699,04 руб;

$ЗП_1 = ЗП_С + ЗП_И$,

$ЗП_1$ = 718792,2 6 + 98699,04 = 817491,3 руб, где

$ЗП_1$ - зарплата до модернизации основных рабочих.

После модернизации будут работать только два специалиста, с более высоким разрядом, причём они одновременно могут обслуживать несколько кранов.

ЗПи= Сч • $к_{дп}$ • $к_{пр}$ • $к_{соц}$ • $n_р$ • F_d •$к_{об,}$, где

$ЗП_С$- заработная плата рабочего до модернизации;

$С_ч$=116,78 р. - часовая ставка рабочего 6-го разряда;

$к_{дп}$=1,2 - коэффициент дополнительных выплат; $к_{пр}$=1,1 - премии;

$к_{соц}$=1,34 - коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды;

$n_р$=2 - количество рабочих;

F_d=l860 ч. - действительный годовой фонд рабочего времени (по нормативно-справочному материалу;

$к_{об}$=0,4 - коэффициент обслуживания.

$ЗП_С$ =116,78 •1,2•1,1 •1,34•2 • 1 860•0,4 = 307361,97 руб.

после модернизации основных рабочих.

$\Delta ЗП = З П_1 - З П_2$

ΔЗП = 817491,3 - 307361,97 = 510129,32 руб. 5.3. Определение срока окупаемости

Итого экономический эффект:

$Э_{ЭФ} = \Delta Э_{СС} + \Delta Э_{СО} + \Delta Пот + \Delta П + \Delta ЗП - З_{АМОР}$

$Э_{ЭФ}$ = 979192,8+116052,48+112570,89+367000+510129,32-323351,34 = 1761594 руб

Срок окупаемости проекта:

$$Ñî ê = \frac{Çäî ï}{Ýýô} = \frac{8420608}{1761594} = 4,8ã.$$

Полученные данные сведём в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Экономические показатели

Показатель	Величина
Дополнительные вложения, руб.	8 420 608,0
Экономия за счёт снижения затрат на энергетические	1207816,17
Амортизационные отчисления, руб.	323351,34
Увеличение прибыли от реализации готовой продукции,	367 000,0
Снижение заработной платы основных рабочих, руб.	510129,32
Общая экономия, руб	1761594
Срок окупаемости дополнительных капитальных затрат,	4,8

1) Внедрение частотно - регулируемого электропривода позволяет:

- Значительно на 30 - 50 % снизить энергопотребление на кранах;
- Сократить затраты на дополнительное оборудование
- Улучшить условия эксплуатации
- Исключить динамические нагрузки

2) Поскольку, при установке частотно - регулируемого электропривода капитальные вложения меньше и меньше энергопотребление по сравнению с нерегулируемым электроприводом то выбор этого варианта является очевидным.

3) Срок окупаемости составляет приблизительно 4,8 года, что ниже норматива предприятия (6лет).

Не менее важную роль в снижении издержек занимает сокращение расхода энергии, что достигается за счёт экономии электрической энергии и повышения КПД. Также значительный экономический эффект дает и снижение заработной платы основных рабочих вследствие повышения автоматизации процесса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ВКР выполнен проект модернизация электропривода механизма тележки мостового крана грузоподъемностью 16 т.

В первом разделе изучены современных тенденций развития систем управления технологическим процессом и требований по монтажу, наладке и испытанию электроприводов, а также изучены методов и средств контроля работоспособности электропривода и качества продукции. Проанализированы необходимость модернизации механизма крана и дальнейшего проектирования системы автоматизированного управления.

Во втором разделе рассчитаны основные статические характеристики механизма, выбран асинхронный двигатель мощностью 3.5 кВт, частотный преобразователь SinamicsG120 и разработана схема электропривода.

В третьем разделе разработана математическая модель электропривода с векторным законом регулирования и получены графики переходных процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов В.Н. Расчёт операционных припусков и определение операционных размеров. Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Технология машиностроения» для студентов специальности 151001.65. М., МГТУ «МАМИ», 2007. 16 с.

2. Ионов В.И., Таратынова Л.Е. Методические указания к выполнению организационно-экономической части дипломного проекта. М., МГТУ «МАМИ», 2007. 48 с

3. Лёвочкин Н.И. Инженерные расчёты по охране труда. М., «Машиностроение». 1994. 116с.

4. Маслов А.Р. Приспособления для металлообрабатывающего инструмента: Справочник. М., «Машиностроение», 1996. 240 с.

5. Ординарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н., Онишко А.В., Сергеев А.К. Справочник инструментальщика. Л., «Машиностроение» (Ленинградское отделение), 1987 г. 846 с.

6. Поседко В.Н. «Разработка структурной схемы маршрута механической обработки деталей». Методические указания к лабораторным работам студентов. М.: МГТУ «МАМИ», 1998. 40 с.

7. Sandvik coromant. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. М., «Полиграфия», 2003. 301 с.

8. Sandvik coromant. CoroKey. Руководство по повышению производительности. Точение, фрезерование, сверление. Изд. 8-е, М., «Полиграфия», 2005. 234 с.

9. Поседко В.Н. «Разработка технологической операции механической обработки деталей». Методические указания к практическим занятиям студентов. М.: МГТУ «МАМИ», 1996. 23 с.

10. Васильев, Б. Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. Учебник. – Москва: СОЛОН – Пресс, 2015. – 268 с.

11. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода: учеб. пособие / Н. Ф. Ильинский. – Москва: МЭИ, 2003. – 224 с.

12.Экономика промышленности: учеб. для вузов по экономическим специальностям под. Ред. Н .А.Савонова.-М.: Юрист, 2005.-581с.

13.Шеховцов В. П. Электрическое и электромеханическое оборудование. – М.: Форум: Инфра-М. 2008. – 407 с.

14.Шеховцов В. П.Справочное пособие по электрооборудованию. – М.: Форум: Инфра-М.2006. – 136 с.

ПОСЛЕДНИЙ ЛИСТ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Дипломная работа выполнена мной совершенно самостоятельно. Все использованные в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

«16» сентября 2023 г.



Боширов Иван Иванович

_____/_____

(подпись) (Ф.И.О.)