

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники
Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Асинхронный электропривод главного подъемного крана КМ-20/5

УДК 621.873-83-52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМБЛ	Толстов Виктор Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бородин Ю.В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники(ОЭЭ) инженерной школы энергетики(ИШЭ)	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D.,К.Т.Н.		

Томск – 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники
Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель отделения

(Подпись) _____ (Дата) Дементьев Ю.Н.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Толстову Виктору Александровичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод главного подъемного крана КМ-20/5

Утверждена приказом директора (дата, номер)	
---	--

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

	01.06.18 г.
--	-------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Титульный лист Задание Реферат Введение Раздел 1 Техническая характеристика механизма подъема крана Раздел 2 Выбор элементов силового канала электропривода Раздел 3 Разработка и исследование моделей электропривода с учетом ШИМ напряжения

	Раздел 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Раздел 5 Социальная ответственность Заключение Список литературы
Перечень графического материала	- функциональная схема электропривода; -имитационная модель; -графики переходных процессов электропривода;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Ляпунов Д.Ю.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А.
Социальная ответственность	Бородин Ю.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.	Доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Толстов В.А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Толстову Виктору Александровичу

Школа	ИШЭ	Подразделение	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Специальность	Электроэнергетика и Электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов: материально-технических, энергетических, финансовых, и человеческих.</i>	<i>Стоимость материальных затрат – стоимость необходимого оборудования определялась согласно средней стоимости по Томской области. Зарботная плата определялась согласно приказу ректора ТПУ о «Окладах ППС и НС».</i>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.</i>	<i>Отчисления на социальные нужды – 30,2 %; норма амортизации – 0,33; расходы на командировки – 10 %; накладные расходы – 16 %;</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. *Инициализация проекта и определение его потенциальных потребителей.*
2. *Организация и планирование научно-исследовательской работы.*
3. *Формирование бюджета на реализацию проекта.*
4. *Определение ресурсной эффективности исследования*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. *Расходы на этапе проектирования на материальные затраты.*
2. *Расходы на этапе проектирования на заработную плату.*
3. *Смета затрат.*
4. *Календарный план-график исследования.*
5. *Сетевой план-график исследования.*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.2018 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		12.03.2018 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Толстов Виктор Александрович		12.03.2018 г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Толстову Виктору Александровичу

Инженерная школа	ИШЭ	Кафедра	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	<p>1. <i>Описание рабочего места на предмет :</i> <i>Разработка системы управления на пользовательском компьютере в помещении площадью 40 м². Проведение экспериментов на стенде с электрооборудованием напряжением до 220 вольт.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	<p>1. <i>Анализ вредных факторов, проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Расчет освещения рабочей зоны, которое должно соответствовать СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, не снижающее зрение человека.</i> – <i>Уменьшение уровня шума.</i> – <i>Проверка уровня воздействия электромагнитного излучения и статического электричества.</i> – <i>Мероприятия для решения проблемы низкой подвижности воздуха.</i> – <i>Мероприятия для уменьшения вибрации.</i> <p>2. <i>Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Составление правил работы с исследуемым оборудованием для предотвращения травматизма от движущихся механизмов.</i> – <i>Электробезопасность.</i> <p>3. <i>Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Правила утилизации твердых отходов.</i> – <i>Анализ влияния электромагнитного и теплового излучения. Меры уменьшения влияния данных факторов.</i> <p>4. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Наиболее вероятным ЧС при исследовании и проверке системы - являются пожар на рабочем месте.</i>
Перечень расч-го и граф-го материала:	<i>Расчет искусственного освещения для помещения.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Толстов В.А.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 5 глав. Общий объем работы 102 с, 25 рисунков, 14 таблиц, 31 источников литературы.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, концевой выключатель, преобразователь частоты, прямой пуск, плавный пуск.

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование асинхронного электропривода главного подъема крана КМ-20/5.

В процессе исследования проводилось описание функциональной и принципиальной схем, а также принципа работы электропривода. Приведено технико-экономическое обоснование, принципиальная схема и принцип действия системы, расчет мощности двигателя и выбор его по каталогу, построение естественных и искусственных механических характеристик двигателя, семейство механических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, схема управления, цикл работы механизма.

Выпускная квалификационная работа выполнена с помощью программ MATLAB, Mathcad 14, MS Excel в текстовом редакторе MS Word и представлена на компакт-диске (в конверте на обороте обложки).

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	10
1 Техническая характеристика механизма подъема крана.....	12
1.1 Механизм главного подъема мостового электрического крана КМ20/5	13
1.2 Кинематическая схема механизма подъема мостового электрического крана КМ20/5.....	18
1.3 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода	20
2 Выбор элементов силового канала электропривода	26
2.1 Параметры приводного двигателя механизма главного подъёма мостового электрического крана КМ20/5.....	27
2.2 Механическая система электропривода и её параметры.....	28
2.3 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным.....	30
2.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя.....	34
2.5 Выбор способа частотного регулирования скорости вращения электродвигателя питателя	38
2.6 Выбор преобразователя частоты.....	38
2.7 Расчет механических и электромеханических характеристик системы преобразователь частоты – двигатель.....	40
3 Разработка и исследование моделей электропривода с учетом ШИМ напряжения	45
3.1 Разработка модели электропривода с учетом ШИМ напряжения инвертора	45
3.2 Расчет параметров системы управления электропривода.....	56

3.3 Исследование электропривода методом компьютерного моделирования	61
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	70
4.1 Инициализация проекта и определение его потенциальных потребителей	70
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	72
4.3 Определение трудоемкости выполнения работ.....	73
4.4 Разработка графика проведения научного исследования	74
4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	77
4.6 Основная заработная плата исполнителей темы	78
4.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	81
4.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) ...	82
4.9 Накладные расходы	82
4.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	83
5 Социальная ответственность	84
5.1 Производственная безопасность.....	84
5.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	85
5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	86
5.4 Экологическая безопасность	90
5.5 Тепловое излучение.....	92

5.6 Утилизация твердых отходов	92
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	95
5.8 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
Список Литературы	100

ВВЕДЕНИЕ

Большинство промышленных предприятий, которые активно используют электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с некоторыми проблемами, одна из проблем это несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. В кранах, которые изготавливаются серийно и находятся в эксплуатации, привод главного подъемного крана осуществляется двигателями постоянного тока с системой регулирования от полупроводниковых преобразователей или асинхронными двигателями с фазным ротором с параметрическим регулированием при помощи изменения сопротивления резисторов, подключаемых к контактным кольцам фазного ротора. Используемое для изменения скорости реостатное регулирование отличается очень низкой энергетической эффективностью. По некоторым данным в электроприводах механизмов подъема до 70 % потребляемой электроэнергии может уходить на обогрев воздуха, причем не только при спуске, но и при подъеме груза.

Подавляющее большинство грузоподъемных кранов оборудовано недорогой и привычной для обслуживания системой управления электроприводом на базе релейно–контакторных панелей, которая очень далека от совершенства, характеризуется зависимостью скорости опускания груза от его массы, негативно влияет на ресурс работы механической части крана и требует значительных расходов по поддержанию работоспособности.

Среди направлений повышения эффективности использования кранового оборудования можно выделить два основных: достаточно

большое снижение энергопотребления и повышение надежности. Использование частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может решить обе задачи достаточно невысокими затратами и является на сегодняшний день наиболее эффективным способом модернизации кранового оборудования. Преимуществами применения частотно-регулируемого электропривода по сравнению с другими схемами управления двигателями являются:

- повышение качества и значительная рационализация системы управления;
- автоматическое передвижение груза по заданной программе, т.е. введение крана в систему АСУ ТП;
- возможность согласованного действия нескольких кранов по заданной программе, например, при монтажно-сборочных работах;
- увеличение надежности и срока службы как самого привода, так и всех его механизмов;
- экономия электроэнергии;
- создание предпосылок для дальнейшего совершенствования как самих кранов, так и систем управления: введение дистанционного управления, ликвидация приборов контроля грузоподъемности, снижение передаточного отношения редуктора, ликвидация полиспастов и т.д.

1 Техническая характеристика механизма подъема крана

Большинство грузоподъемных кранов характеризуется постоянно меняющимися условиями использования, поэтому механизмы кранов, имеющие в своем составе электроприводы, должны быть в максимальной степени приспособлены к постоянно видоизменяющейся работе с грузами, разнообразными по массе, размерам, форме, и в условиях производственных помещений или на открытых грузовых площадках. В мостовых кранах механизм подъема груза размещен на крановой тележке. В зависимости от назначения крана тележки комплектуют одним, двумя или, весьма редко, тремя механизмами подъема: главным — на номинальную грузоподъемность и вспомогательными на грузоподъемность, меньшую номинальной в 3—5 раз для кранов средней грузоподъемности и в 4—10 раз для кранов большой грузоподъемности.

Схема механизма подъема кранов общего и специального назначений зависит от многих факторов: типа грузозахватного устройства, массы поднимаемого груза, высоты подъема, необходимых устойчивых скоростей подъема или опускания груза и т. д.

Обычно для подъема груза используют редукторный привод с полиспасной подвеской. Подъем осуществляется на скоростях не более 1 м/с и при ускорениях $0,1 \div 0,5 \text{ м/с}^2$. Скоростные параметры определяют производительность механизмов, их энергоемкость и технологические условия работы. Механизмы подъема кранов должны иметь малые установочные и посадочные скорости для обеспечения безопасной посадки грузов и грузозахватных органов либо для снижения нагрузки на механические тормоза в целях обеспечения необходимого уровня их износостойкости. Нагрузка механизма подъема изменяется как по

абсолютному значению от номинальных до холостого хода, так и по направлению в режиме тяги (подъема) и торможения (спуска). При принятых скоростях подъема во время пуска и торможения в системах привода возникают ударные нагрузки, значительно превышающие номинальные значения, поэтому должны быть предусмотрены специальные меры по их ограничению.

1.1 Механизм главного подъема мостового электрического крана КМ20/5

В качестве приводного двигателя принят электродвигатель типа МТКФ-412-6, асинхронный, с короткозамкнутым ротором, 380В, 30кВт, 945 об/мин. На лебедке механизма установлен тормоз типа ТКГ-300МУ2, 380В, 50Гц. Управление электродвигателем механизма осуществляется при помощи преобразователя частоты 1UZ SINAMICS G120 POWER MODULE PM240, 37KW, с управляющим модулем SINAMICS G120 CONTROL UNIT CU240S, производства SIEMENS.

С преобразователем SINAMICS G120 используется панель оператора, входящая в комплект привода. Панель можно использовать для управления приводом, когда привод находится в режиме местного управления в процессе наладки. Команды управления подаются с клавиатуры панели управления и всегда имеют приоритет над внешними сигналами управления. Коэффициент полезного действия преобразователя – не менее 0,97. Коэффициент мощности – не менее 0,95.

Преобразователь частоты обеспечивает увеличение ресурса работы электротехнического и механического оборудования за счет

плавности регулирования частоты при разгоне и торможении, отсутствия пусковых моментов повышенной кратности и механических ударных нагрузок.

Преобразователь частоты обеспечивает:

- * оперативное включение – отключение приводного двигателя;
- * плавный частотный разгон с заданным темпом;
- * формирование заданных значений пускового тока и момента двигателя;
- * поддержание заданного значения частоты вращения;
- * реверсирование и торможение привода;
- * защиту преобразователя и двигателя в аварийном и внештатном режимах;
- * сигнализацию и информацию о режимах работы привода.
- * включение тормоза только после автоматической проверки схемой появления выходного напряжения на двигателе;
- * регулируемый статизм механической характеристики.

Преобразователь частоты дополнительно комплектуется резистором

динамического торможения. Для защиты от помех преобразователь частоты снабжен сетевым дросселем и выходным дросселем.

На всех скоростях система регулирования привода обеспечивает разгон и замедление механизма в функции времени с помощью задатчика интенсивности, который скачкообразный сигнал задания преобразовывает в сигнал с прямолинейным плавным изменением величины напряжения до заданного уровня. Управление приводом осуществляется из кабины командоконтроллером типа ККП-1108АУ2.

В мостовых кранах механизм подъема груза размещен на крановой тележке. В зависимости от назначения крана тележки комплектуют одним, двумя или, весьма редко, тремя механизмами подъема: главным — на номинальную грузоподъемность и вспомогательными на грузоподъемность, меньшую номинальной в 3—5 раз для кранов средней грузоподъемности и в 4—10 раз для кранов большой грузоподъемности.

Схема механизма подъема кранов общего и специального назначений зависит от многих факторов: типа грузозахватного устройства, массы поднимаемого груза, высоты подъема, необходимых устойчивых скоростей подъема или опускания груза и т. д. Общая компоновка и размещение механизмов подъема на тележках кранов общего назначения грузоподъемностью 5...50 и 80...320 т, а на тележках кранов специального назначения.

Этот механизм состоит из грузового каната, сбегającego с барабана и огибающего блоки крюковой подвески, обводные блоки и уравнильный блок, редуктора, снабженного тормозом, промежуточного быстроходного вала и приводного электродвигателя. Для выигрыша в тяговом усилии в механизмах подъема используют полиспаст, который представляет собой систему подвижных (в крюковой подвеске) и неподвижных (обводных) блоков. Механизмы подъема кранов грузоподъемностью 80...320 т выполняют по такой же схеме, отличаются они только наличием дополнительной понижающей зубчатой передачи или второго редуктора, с помощью которых выходной вал главного редуктора соединен с барабаном. При этом второй редуктор выполняет функцию быстроходной передачи. Колесо дополнительной

зубчатой передачи жестко соединено с барабаном, а шестерня установлена на отдельном валу на опорах и присоединена к выходному валу основного редуктора с помощью зубчатой муфты или установлена на выходном валу редуктора. Для уменьшения консольной нагрузки, действующей на вал редуктора, используют дополнительную опору-кронштейн, присоединяемый к корпусу редуктора.

На рисунке 1 показан общий вид расположения механизма главного и вспомогательного подъема на тележке мостового крана общего назначения грузоподъемностью 20/5 т. В механизме главного подъема использован четырехкратный сдвоенный полиспаст. Привод главного и вспомогательного подъемов осуществляется соответственно электродвигателями и редукторы. На выходных валах редукторов установлены тормозные шкивы для тормозов.

В магнитных кранах, оборудованных грузовым электромагнитом, механизм подъема (см. рисунок 1) снабжен дополнительно специальным кабельным барабаном и токосъемником для гибкого кабеля, подводящего электроэнергию к грузовому электромагниту. Кабельный барабан установлен в опорах вблизи барабана механизма подъема, от которого через зубчатую или цепную передачу приводится в движение. Причем передаточное число передачи выбирается таким, чтобы обеспечивалось синхронное движение электромагнита и кабеля при работе механизма подъема.

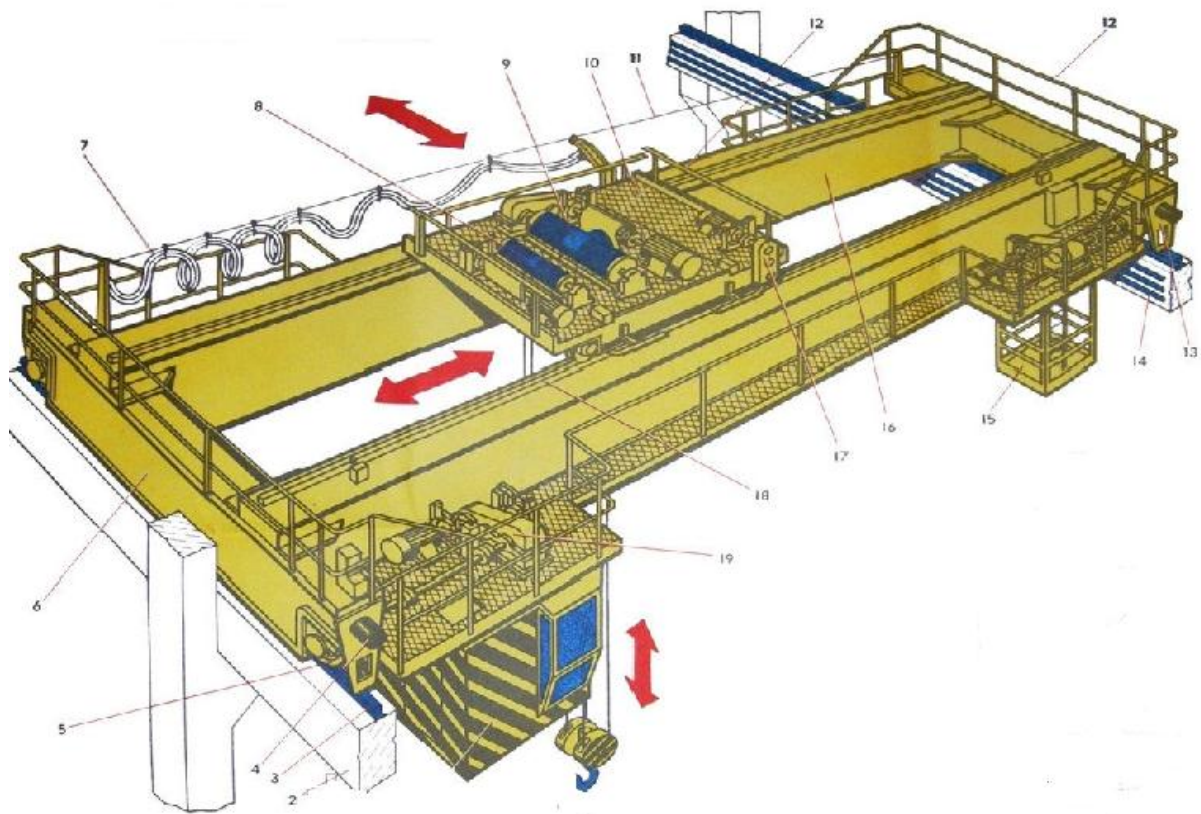


Рисунок 1 – Размещение механизмов главного и вспомогательного подъема на тележке крана общего назначения грузоподъемностью 20/5 т

- 1 - Кабина управления;
- 2 - Балка;
- 3 – Крановые рельсы;
- 4 – Эластичный буфер;
- 5 – Ходовое колесо;
- 6 – Концевая балка моста;
- 7 – Кабельный токопровод;
- 8 – Вспомогательный механизм подъема груза;
- 9 – Основной механизм подъема груза;
- 10 – Грузовая тележка;
- 11 – Несущий канат кабельного токопровода;
- 12 – Перила;
- 13 – Щиток;
- 14 – Цеховые троншеи;
- 15 – Инвентарная люлька для выполнения осмотров;

- 16 – Главная балка моста;
- 17 – Механизм передвижения грузовой тележки;
- 18 – Рельсы грузовой тележки;
- 19 – Механизм передвижения крана.

1.2 Кинематическая схема механизма подъема мостового электрического крана КМ20/5

Кинематическая схема механизма представлена на рисунке 2.

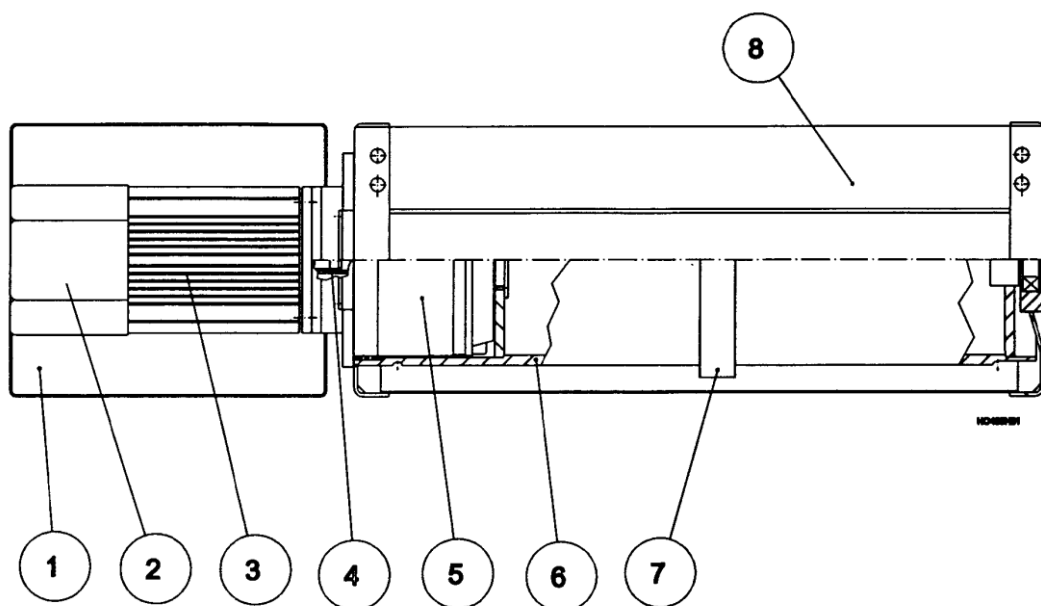
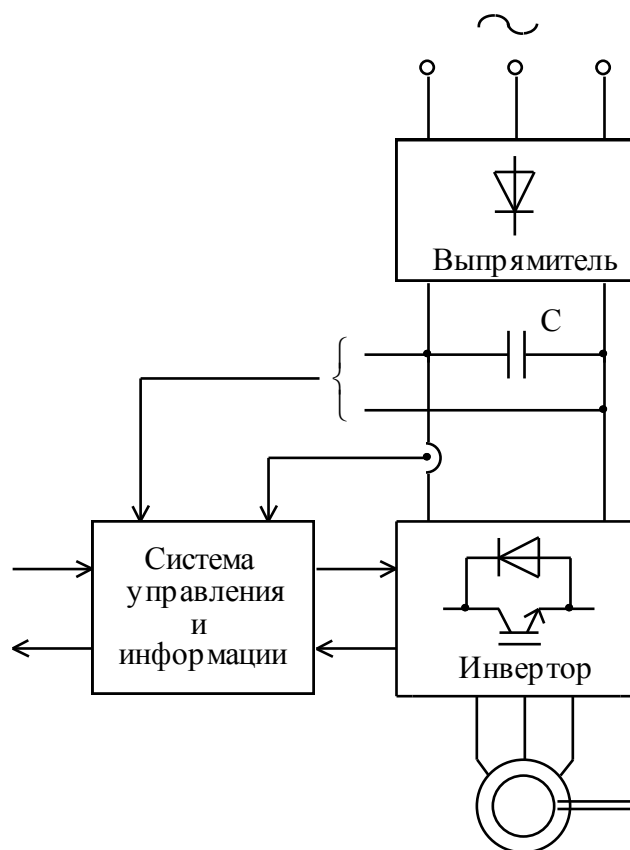


Рисунок 2 – Кинематическая схема электропривода подъема крана:

1 – корпус; 2 – электромагнитный тормоз; 3 – электродвигатель; 4 – муфта; 5 – редуктор; 6 – барабан; 7 – канатоукладчик

Работа механизма подъема заключается в следующем: питание подается одновременно на электродвигатель 3 и на электромагнитный тормоз 2. При подаче питания на электромагнитный тормоз он разжимается, и двигатель начинает вращаться. Через муфту 4 вращение передается на редуктор 5. Редуктор приводит в движение барабан 6. При вращении барабана вдоль него двигается канатоукладчик 7.

Канатоукладчик, двигаясь вдоль оси барабана, помогает укладывать каната в пазы барабана. Это необходимо для равномерной укладки каната. В случае если канат будет неравномерно укладываться, возможно его запутывание и дальнейшая работа будет осложнена.



В данном механизме применен трехступенчатый редуктор с передаточным числом 71. Общий вид редуктора приведен на рисунке 3.

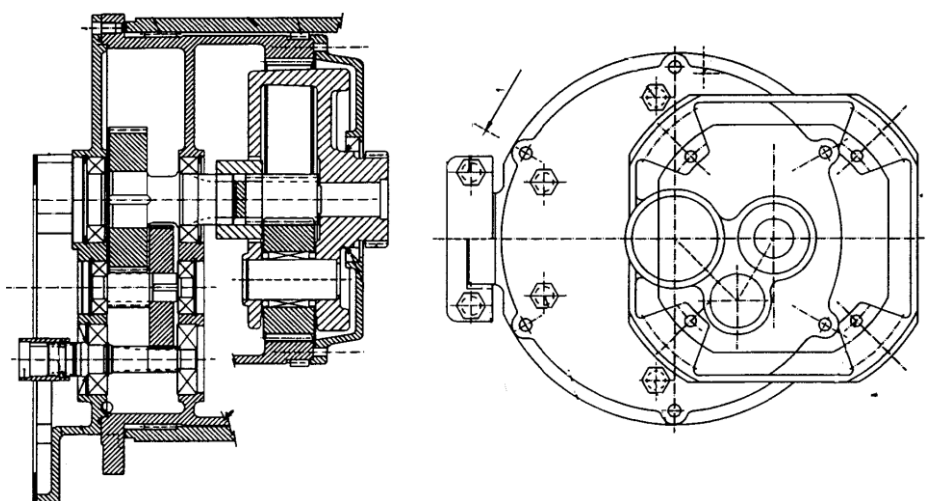


Рисунок 3 – Редуктор механизма подъема крана

1.3 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода

Многие промышленные предприятия, активно использующие электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с проблемой несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. Большинство находящихся в эксплуатации крановых электроприводов выполнено на базе асинхронных двигателей с фазным ротором, которые управляются силовыми контроллерами или низковольтными комплектными устройствами (панелями управления). Основным достоинством таких электроприводов является простота их использования, низкая стоимость и ремонтпригодность. Однако эти электроприводы не лишены и весьма существенных недостатков.

Вот некоторые из них:

- большие потери энергии, обусловленные низким $\cos\phi$ и КПД;

- выход из строя электродвигателей из-за перекосов в роторных цепях, вызванных потерей контактов в цепях сопротивлений или контакторах ускорений;
- ударное изменение момента двигателей, и как следствие динамические перегрузки узлов крана, обусловленные ступенчатым выведением сопротивлений из цепи ротора;
- невозможность получения посадочной скорости в электроприводах механизмов подъема с силовыми контроллерами;
- отсутствие режима силового спуска пустого крюка и легких грузов в электроприводах механизмов подъема с панелями управления;
- отсутствие электрического торможения в электроприводах механизмов передвижения;
- низкая износостойкость релейно-контакторной аппаратуры;
- большие потери энергии при спуске и торможении электроприводов в интенсивном режиме работы.

Зачастую промышленные предприятия, где установлены краны, изменяют технологию производства и номенклатуру выпускаемой продукции, делают перепланировку производственных и складских помещений, краны, управляемые из кабины, переводятся на управление с пола по радиоканалу и т.д.

Сегодня наиболее эффективным методом модернизации (реконструкции) электрооборудования крана считается использование частотно-регулируемого электропривода.

Использование частотно-регулируемых электроприводов обеспечивает следующие преимущества:

- существенное, до 60%, снижение энергопотребления;

- повышение точности и качества регулирования скорости;
- плавность пуска и торможения увеличивают срок службы всех механических элементов, повышают комфортность управления и обеспечивают сохранность груза;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором дешевле и надежнее двигателей с фазным ротором и двухскоростных двигателей.

Встроенные функции преобразователя позволяют легко интегрировать их в электроприводы подъемно-транспортного оборудования. Преобразователь имеет развитую систему диагностики с выдачей сообщения об ошибках и сбоях на графический терминал. Функция управления тормозом предназначена для выдачи сигнала на открытие тормоза (по достижении двигателем необходимого момента) и сигнала на наложение тормоза (при снижении скорости до минимального уровня). Для корректировки тока снятия тормоза в зависимости от веса груза может использоваться функция весоизмерения, для чего используется внешний датчик груза (например, из состава ограничителя грузоподъемности).

Разгон и торможение приводов с использованием частотного преобразователя осуществляется по S-образному закону, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана. Поскольку управляемое торможение выполняет сам электропривод, а тормоз служит для удержания механизма после полной остановки, существенно уменьшается раскачивание груза после остановки. В процессе разгона и/или торможения электропривода возможно изменение времени пуска и торможения внешним сигналом

или по достижении определенной выходной частоты преобразователя. Профиль кривых пуска и торможения позволяют выбрать наиболее подходящий для конкретного механизма закон управления скорости.

Функция позиционирования по конечным выключателям позволяет подключать контакты выключателей непосредственно к логическим входам преобразователя. Концевые выключатели могут использоваться для предварительного снижения скорости и останова.

Ограничение момента при векторном управлении позволяет формировать требуемую механическую характеристику, причем для двигательного и генераторного режима работы ограничение момента может задаваться индивидуально.

Сложившаяся практика использования частотного электропривода основывается на том, что электроэнергия, генерируемая двигателем при опускании груза или при торможении инерционного механизма, передается на блоки тормозных сопротивлений и преобразуется в тепловую энергию. Торможение с подключением внешнего резистора получило наибольшее распространение в электроприводах с преобразователями частоты как отечественного, так и зарубежного производства.

У такого способа торможения есть ряд недостатков. Тормозной резистор подключается к каждому преобразователю частоты, что увеличивает стоимость электропривода и ухудшает массогабаритные показатели установки. Энергия торможения, за исключением потерь в элементах электропривода, выделяется в виде тепловой на тормозном резисторе, что приводит к его значительному нагреву и нерациональному использованию электрической энергии. Альтернативой такому

нерациональному использованию энергии является применение модулей рекуперации, которые заменяют резисторы в приводах с длительной работой в генераторном режиме или имеющих большую тормозную мощность, как, например, у подъемных и инерционных механизмов. В этом случае энергия торможения электропривода возвращается в питающую сеть.

Сегодня, с развитием преобразовательной техники, с одной стороны, и постоянно растущими тарифами на электроэнергию, с другой стороны, применение модулей рекуперации становится все более актуальным.

Основные качества (преимущества) модулей рекуперации:

- компактность;
- простой ввод в эксплуатацию без необходимости программирования и настройки;
- возможность подключить к звену постоянного тока нескольких преобразователей частоты;
- возможность параллельного подключения до 4 модулей рекуперации;
- благодаря энергосбережению и с учетом стоимости исключенных из схемы тормозных сопротивлений обеспечивается окупаемость в течении 1-2 лет.

Цена комплекта «частотный преобразователь - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» сопоставима с ценой других решений, как, к примеру «пусковой дроссель двигатель с фазным ротором».

В целом, применение частотно-регулируемого электропривода является наиболее современным решением для кранового электропривода.

2 Выбор элементов силового канала электропривода

Частотные преобразователи используются с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Зачастую разработчики или изготовители кранов, модернизируя крановый электропривод, применяют для частотно-регулируемого электропривода традиционные электродвигатели крановой серии, имеющие роторы специального исполнения, залитые сплавом повышенного сопротивления. Это продиктовано, в первую очередь, требованиями обеспечения повышенного момента в процессе частых пусков. Для создания удовлетворительного теплового режима принимаются специальные меры по снижению кратности пусковых токов, увеличивается расход активных материалов. Все это приводит к увеличению массы и стоимости двигателя. Система изоляции и подшипниковые узлы серийных двигателей не приспособлены для работы с преобразователями частоты, что приводит к преждевременному выходу из строя обмоток статора, выплавлению стержней ротора, разрушению подшипников и датчиков положения, применяющихся в электроприводе главного подъема. Система управления получается нерациональной из-за необходимости применения более мощных преобразователей частоты и двигателей больших габаритов. Очевидно, что для частотно-регулируемого электропривода необходимо применять специальные двигатели [2].

С учетом вышесказанного, для электропривода механизма подъема крана выбираем асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором крановой серии типа МТКФ412-6, адаптированный для работы от преобразователя частоты.

Структура условного обозначения:

МТК – обозначение серии;

М – модернизированный;

6 – число полюсов;

У2 – климатическое исполнение.

Технические данные электродвигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические данные двигателя МТКФ412-6

Типоразмер двигателя	Мощность P_2 , кВт	Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	При номинальной нагрузке		
			частота вращения n_n , об/мин	КПД η_n , %	$\cos\phi_n$
МТКФ412-6	30	1000	935	83.5	0,78
M_{\max}	$M_{\text{пуск}}$	$I_{\text{пуск}}$	$J_{\text{дв.}}$ кг·м ²	Степень защиты	Климат. испол.
981 Н·м	932 Н·м	380 А	0,638	IP54	У1

Примечания к таблице 1

1 Технические характеристики приведены для основного режима работы S3 (ПВ = 40 %).

Номинальное напряжение 220/380 В, номинальная частота 50 Гц.

2.1 Параметры приводного двигателя механизма главного подъёма мостового электрического крана КМ20/5.

Расчетные параметры электродвигателя:

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_{\text{н}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{1000 - 935}{1000} = 0,065.$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$\omega_{\text{двн}} = \frac{n_{\text{ном}}}{9,55} = \frac{935}{9,55} = 97,905 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 1000}{\omega_{\text{дв.}}} = \frac{30000}{97,905} = 308,042 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 1000}{3 \cdot U_{1\phi\text{н}} \cdot \cos \phi_{\text{н}} \cdot \frac{\eta_{\text{н}}}{100}} = 70 \text{ А}.$$

Определим кратность максимального и пускового момента двигателя

$$m_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{981}{308,042} = 3,184;$$

$$m_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{932}{308,042} = 3,025$$

и кратность пускового тока

$$k_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{н}}} = \frac{380}{70} = 5,45.$$

2.2 Механическая система электропривода и её параметры

Расчетная схема замещения механической системы электропривода питателя может быть представлена в виде одномассовой системы (рисунок 4).

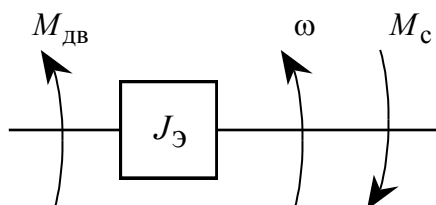


Рисунок 4 – Расчетная схема механической системы привода

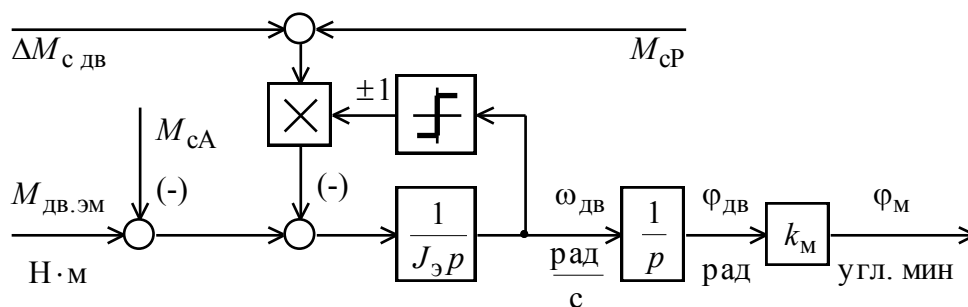


Рисунок 5 – Структурная схема одномассовой механической системы электропривода: а – регулируемого; б – следящего

На схеме рисунке 4 приняты следующие обозначения:

$M_{дв}$ – вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя, Н·м;

$M_{н}$ – момент нагрузки с учетом потерь в механизме, приведенный к валу двигателя, Н·м;

ω – угловая скорость, рад/с;

$J_э$ – эквивалентный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, кг·м².

Эквивалентный момент инерции

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + k \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{ш.пр}} = 0.1 + 0.2 \cdot 0.638 + 0.0182 = 0.2458 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где

$k = 0.2$ – коэффициент, учитывающий момент инерции соединительной муфты и первой шестерни редуктора.

2.3 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя воспользуемся его математической моделью, соответствующей простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя Т-образной схеме замещения. Расчёт параметров схемы замещения асинхронного двигателя МТКФ-412-6 по его каталожным данным (таблица 1) произведён в соответствии с методикой, изложенной в [5].

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p^* \cdot I_{1Н} \cdot (1 - s_H)}{1 - p^* \cdot s_H} \right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_H)}{1 - p^* \cdot s_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{0.812^2 - \left[\frac{0.75 \cdot 34.8 \cdot (1 - 0.744)}{1 - 0.75 \cdot 0.744} \right]^2}{1 - \left[\frac{0.75 \cdot (1 - 0.774)}{1 - 0.75 \cdot 0.744} \right]^2}} = 36.552 \text{ А},$$

где

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1Н} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{0.75 \cdot 30000}{3 \cdot 220 \cdot 0.867 \cdot 0.905} = 71.945 \text{ А} \text{ – ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;

$$p^* = \frac{P}{P_H} \text{ – коэффициент загрузки двигателя, принимаем } p^* = 0.75;$$

η_{p*} – КПД двигателя при частичной нагрузке, $\eta_{0.75} = 0.905$;

$\cos \varphi_{p*}$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке,

$\cos \varphi_{0.75} = 0.867$.

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_K \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K} \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.774)}{2 \cdot 3.824 \cdot 30000 \cdot 1.021^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.774} \right)} = 0.258 \text{ Ом},$$

где β – коэффициент, значение которого находится в диапазоне $0.6 \div 2.5$, предварительно принимаем $\beta = 1$;

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_{\text{идв}} \cdot I_{1\text{н}}} = 1 + \frac{10.272}{2 \cdot 5.694 \cdot 71.945} = 1.045 \quad \text{– расчетный}$$

коэффициент;

$$s_K = s_H \cdot \frac{m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)} =$$

$$= 0.03 \cdot \frac{3.824 + \sqrt{3.824^2 - [1 - 2 \cdot 0.07 \cdot 1 \cdot (3.824 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.07 \cdot 1 \cdot (3.824 - 1)} = 0.774$$

– критическое скольжение двигателя.

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.045 \cdot 0.258 \cdot 0.8 = 0.215 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 1.045 \cdot 1.015 \cdot 0.258 = 0.273 \text{ Ом},$$

где

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0.774^2} - 0.8^2} = 1.015.$$

Найденное значение коэффициента $\gamma = 1.015$, практически определяющее отношение индуктивного сопротивления короткого замыкания в номинальном режиме к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора (коэффициент $C_1 \approx 1$), для двигателя мощностью 30 кВт является приемлемым.

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X_{2\sigma}' = 0.58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{0.273}{1.045} = 0.152 \text{ Ом}.$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2\pi f_1} = \frac{0.152}{2\pi \cdot 50} = 0.483 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 0.273 = 0.115 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f_1} = \frac{0.115}{2\pi \cdot 50} = 0.365 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_{\mu}}{I_0} = \frac{202.77}{36.552} = 5.547 \text{ Ом},$$

где

$$\begin{aligned} E_{\mu} &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1H} \cdot R_1)^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi_H - I_{1H} \cdot X_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.78 - 71.945 \cdot 0.215)^2 + (220 \cdot \sin(\arccos(0.78)) - 71.945 \cdot 0.115)^2} = \\ &= 202.77 \text{ В}. \end{aligned}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме.

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_1} = \frac{5.547}{2\pi \cdot 50} = 0.018 \text{ Гн}.$$

Полученные расчётные параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры схемы замещения АД

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2', \text{ Ом}$	$X_{кн}, \text{ Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{ Ом}$	$X_{2\sigma}', \text{ Ом}$	$X_{\mu}, \text{ Ом}$
0.215	0.258	0.273	0.115	0.152	5.547

Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

$$\Psi_{2H(1)} = \frac{M_{\text{эм.н}}^*}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma})} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2}} =$$

$$= \frac{333.979}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0.018}{(0.018 + 4.83 \cdot 10^{-4})} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{71.945^2 - 36.552^2}} = 0.913 \text{ Вб};$$

$$\Psi_{2H(2)} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 36.552 \cdot 0.018 = 0.913 \text{ Вб}.$$

$\Psi_{2i(1)} = \Psi_{2i(2)}$ - следовательно параметры схемы замещения рассчитаны верно.

$$M_{\text{дв.н}} = 308.846 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = 1.05 \cdot M_{\text{дв.н}} = 1.05 \cdot 308.846 = 333.979 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}}^* - M_{\text{дв.н}} = 333.979 - 308.846 = 25.937 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$ рассчитывается по выражениям:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.258}{157.07 \cdot s \cdot \left[5.547^2 + \left(0.215 + \frac{0.258}{s} \right)^2 + \left(\frac{0.215 \cdot 0.258}{s \cdot 5.547} \right)^2 \right]};$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Естественная механическая характеристика двигателя $\omega(M)$ приведена на рисунке 6.

Номинальный электромагнитный момент электродвигателя

$$M_{\text{эмн}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.258}{157.07 \cdot s \cdot \left[5.547^2 + \left(0.215 + \frac{0.258}{s} \right)^2 + \left(\frac{0.215 \cdot 0.258}{s \cdot 5.547} \right)^2 \right]} = 350.38 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

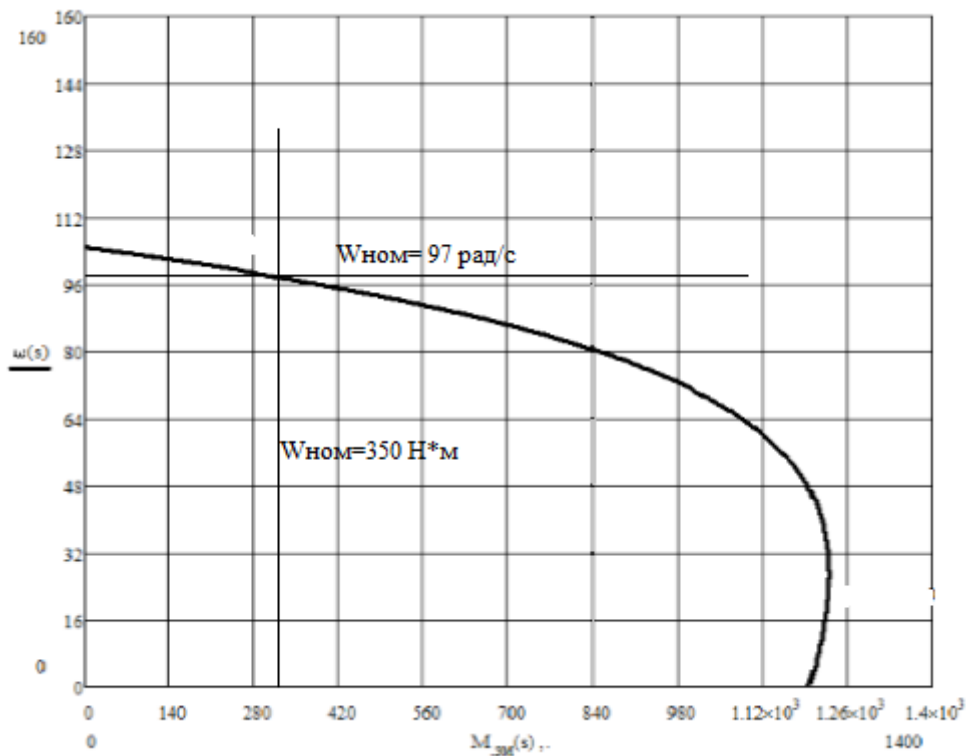


Рисунок 6 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$

Естественные электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$ асинхронного двигателя рассчитывается по выражениям:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0.215 + \frac{0.258}{s}\right)^2 + 0.273^2 + \left(\frac{0.215 \cdot 0.258}{s \cdot 5.547}\right)^2}};$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s)^2 \cdot \sin \varphi_2} =$$

$$= \sqrt{38.826^2 + I_2'(s)^2 + 2 \cdot 38.826 \cdot I_2'(s)^2 \cdot \sin \varphi_2}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s),$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{кн}^2}} = \frac{1.059}{\sqrt{\left(0.215 + \frac{0.258}{s}\right)^2 + 0.273^2}}.$$

Естественные электромеханические характеристики двигателя $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$ приведены на рисунке 7.

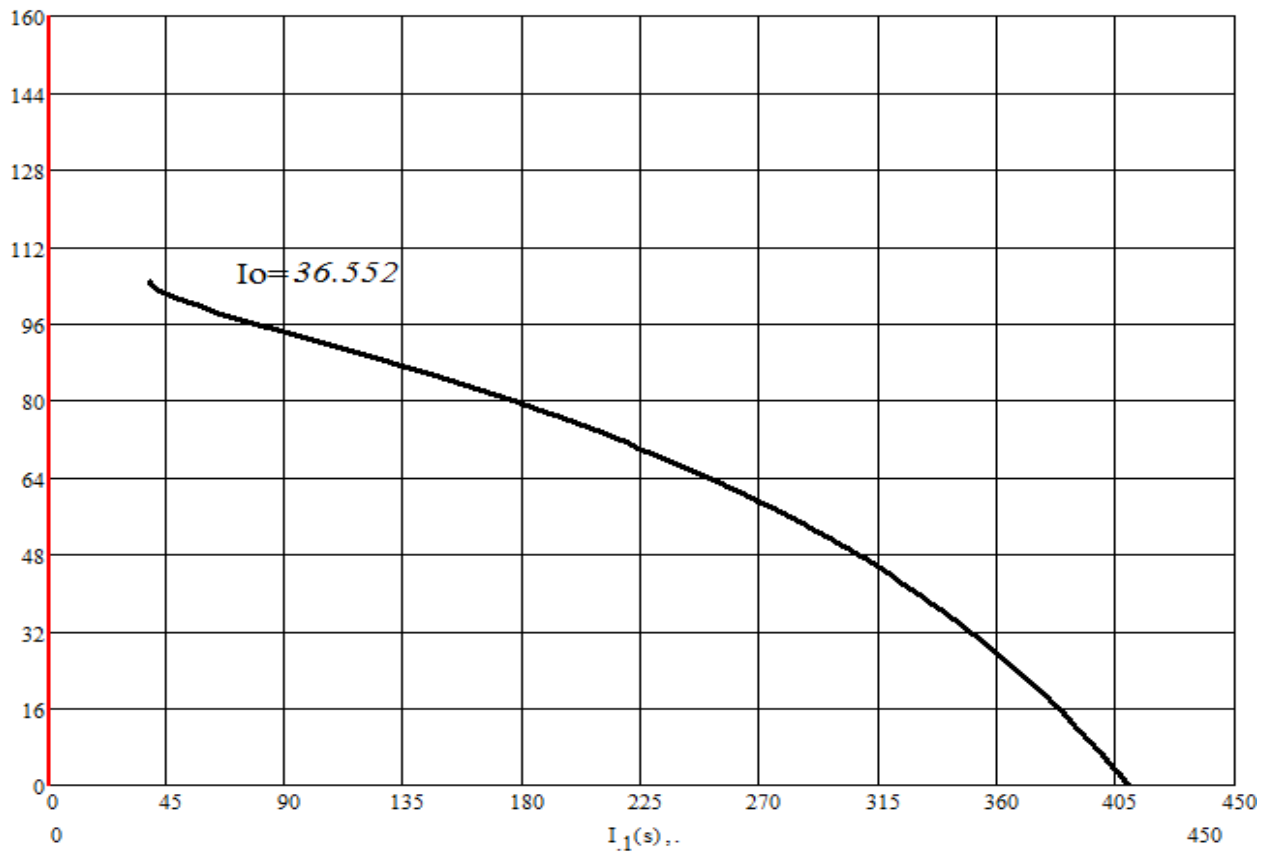


Рисунок 7 - Естественные электромеханические характеристики асинхронного двигателя $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2)$,
 $I_0 = 36.552 \text{ A}$

Рассчитанные характеристики на рабочих участках достаточно хорошо соответствуют каталожным параметрам электродвигателя:

$$M_{\text{макс}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 3.824 \cdot 308.042 = 1178 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 3.759 \cdot 308.042 = 1158 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$I_{1\text{п}} = k_{\text{идв}} \cdot I_{1\text{н}} = 5.69 \cdot 34.8 = 409.652 \text{ A}.$$

Это говорит о том, что принятые параметры схемы замещения соответствуют действительным параметрам электродвигателя и могут быть использованы для расчета статических характеристик и

имитационного моделирования динамических процессов в асинхронном электродвигателе при частотном регулировании.

2.5 Выбор способа частотного регулирования скорости вращения электродвигателя питателя

В простейшем случае частотное регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя осуществляется с помощью разомкнутой системы скалярного управления путем изменения частоты и амплитуды трехфазного напряжения, подаваемого на двигатель. Векторное управление является более сложным, но позволяет получить более высокие качественные показатели регулирования. Для выбора способа управления при частотном регулировании в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель воспользуемся рекомендациями, представленными в подразделе 3. Анализ технических требований к электроприводу питателя ПСУ и показателей, приведенных в таблице, показывает, что достаточным является применение разомкнутой системы скалярного управления. Однако, учитывая необходимость обеспечения запаса по моменту не только в нижней, но и в верхней части диапазона регулирования скорости, окончательный выбор способа частотного управления асинхронным электродвигателем осуществим

по результатам расчета механических и электромеханических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель.

2.6 Выбор преобразователя частоты

В соответствии с техническими требованиями к электроприводу и рекомендациями, выбираем преобразователь частоты 3G3RV-A4185 компании *Omron*. Практическая эксплуатация таких преобразователей

подтвердила их хорошие технические, эксплуатационные и энергетические характеристики. Технические характеристики преобразователя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики преобразователя частоты 3G3RV-A4185

Наименование параметра	Значение
Номинальная выходная мощность, кВА	30
Максимальная мощность двигателя, кВт	37
Номинальный выходной ток, А	39
Максимальный выходной ток в течение 1 минуты, %	150 (0.5 Гц)
Максимальное выходное напряжение, В	380-480
Диапазон регулирования частоты, Гц	0.01–150
Количество фаз сети	3
Частота сети, Гц	(50÷60)±2
Защитное исполнение	IP20
Потребляемая мощность, Вт	634
Диапазон регулирования скорости	1:40 – скалярное управление 1:100 – векторное разомкнутое управление
Разрешение по выходной частоте, Гц	0.001
Время ускорения/замедления, с	0.01–6000
Защита от перегрузки по току, %	200

Допустимый ток преобразователя (в течение 1 минуты)

$$I_{\text{и макс}} = k_1' \cdot I_{\text{ин}} = 1.5 \cdot 39 = 58.5 \text{ A}.$$

Ток отключения преобразователя

$$I_{\text{и откл}} = k_1'' \cdot I_{\text{ин}} = 2 \cdot 39 = 78 \text{ A}.$$

2.7 Расчет механических и электромеханических характеристик системы преобразователь частоты – двигатель

Нагрузка электропривода ПСУ является постоянной по значению в технологическом цикле, поэтому регулирование скорости вниз от основной (номинальной) скорости двигателя ($n_0 = 1500$ об/мин) до минимальной рабочей скорости $n_{\text{р.мин}} = 500$ об/мин ($\omega_{\text{р.мин}} = 52.36$ рад/с) осуществляется при реализации закона управления $U_1 / f_1 = \text{const}$. Вверх от основной скорости до максимальной скорости $n_{\text{р.макс}} = 1900$ об/мин ($\omega_{\text{р.макс}} = 198.95$ рад/с) регулирование осуществляется при постоянном значении напряжения $U_1 = \text{const}$ путем повышения частоты.

Механические характеристики двигателя $\omega(M)$ при переменных значениях частоты и напряжения питания рассчитываются по выражениям:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2(f_1) \cdot 0.202}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[0.273^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(0.215 + \frac{0.252}{s} \right)^2 + \left(\frac{0.215 \cdot 0.252}{s \cdot 5.547 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]}$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s),$$

где $U_1(f_1) = U_{1\phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}$ при $f_1 < f_{1H}$; $U_1(f_1) = U_{1\phi H}$ при $f_1 \geq f_{1H}$.

По результатам расчета построено семейство механических характеристик $\omega(M)$ (рисунок 9).

Электромеханические характеристики двигателя $\omega(I_1)$ при переменных значениях частоты и напряжения питания рассчитываются по выражениям

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0(f_1)^2 + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \phi_2(s, f_1)};$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_{1\phi}(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot f_{1\text{н}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_{1\phi}(f_1)}{\pm \sqrt{\left(0.215 + \frac{0.258}{s}\right)^2 + 0.273^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{0.215 \cdot 0.258}{s \cdot 5.547 \cdot f_{1\text{н}}}\right)^2}};$$

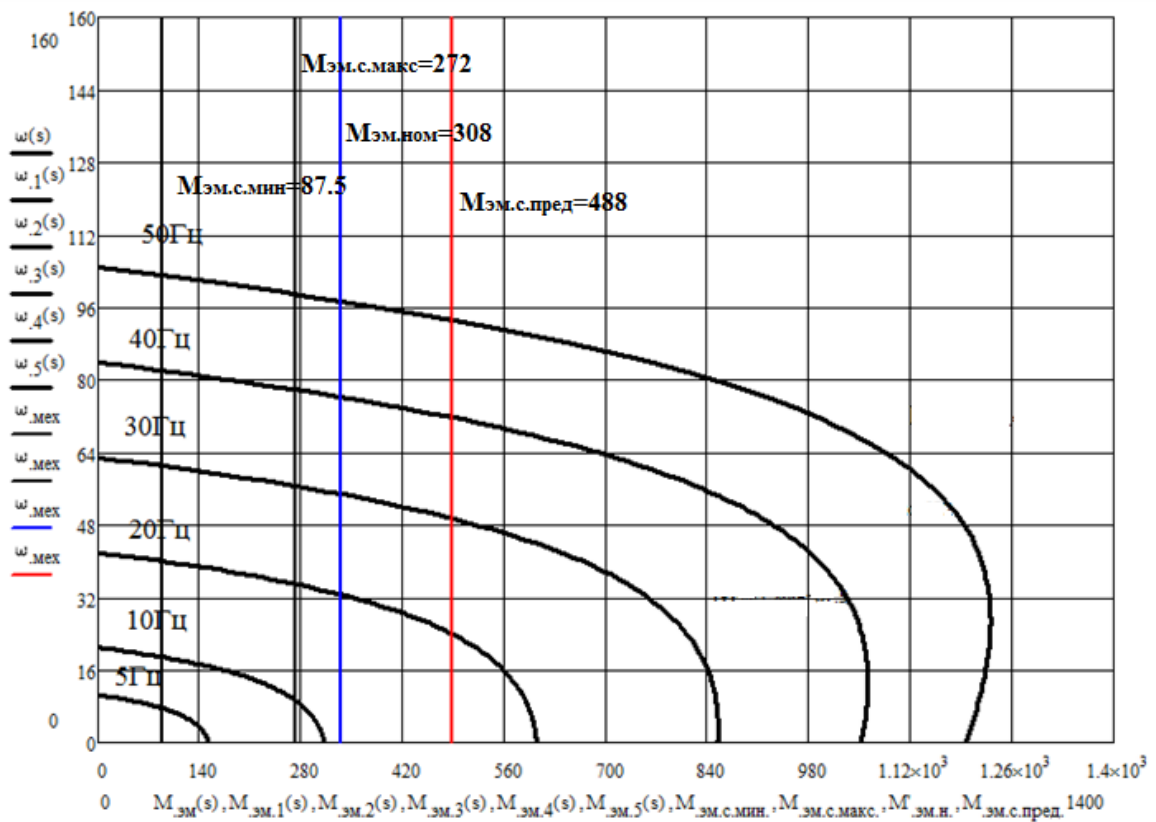


Рисунок 9 – Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при скалярном управлении и законе регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$

$$\begin{aligned} \sin \varphi_2(s, f_1) &= \frac{x_{\text{KH}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{H}}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{KH}}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{H}}}\right)^2}} = \\ &= \frac{0.273 \cdot \frac{f_1}{50}}{\sqrt{\left(0.215 + \frac{0.258}{s}\right)^2 + 0.273^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_0(f_1) &= \frac{U_{1\Phi}(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (x_{1\text{H}} + x_{\mu})^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{H}}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_{1\Phi}(f_1)}{\sqrt{0.215^2 + (0.115 + 5.547)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2}}. \end{aligned}$$

По результатам расчетов построено семейство электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ (рисунок 10).

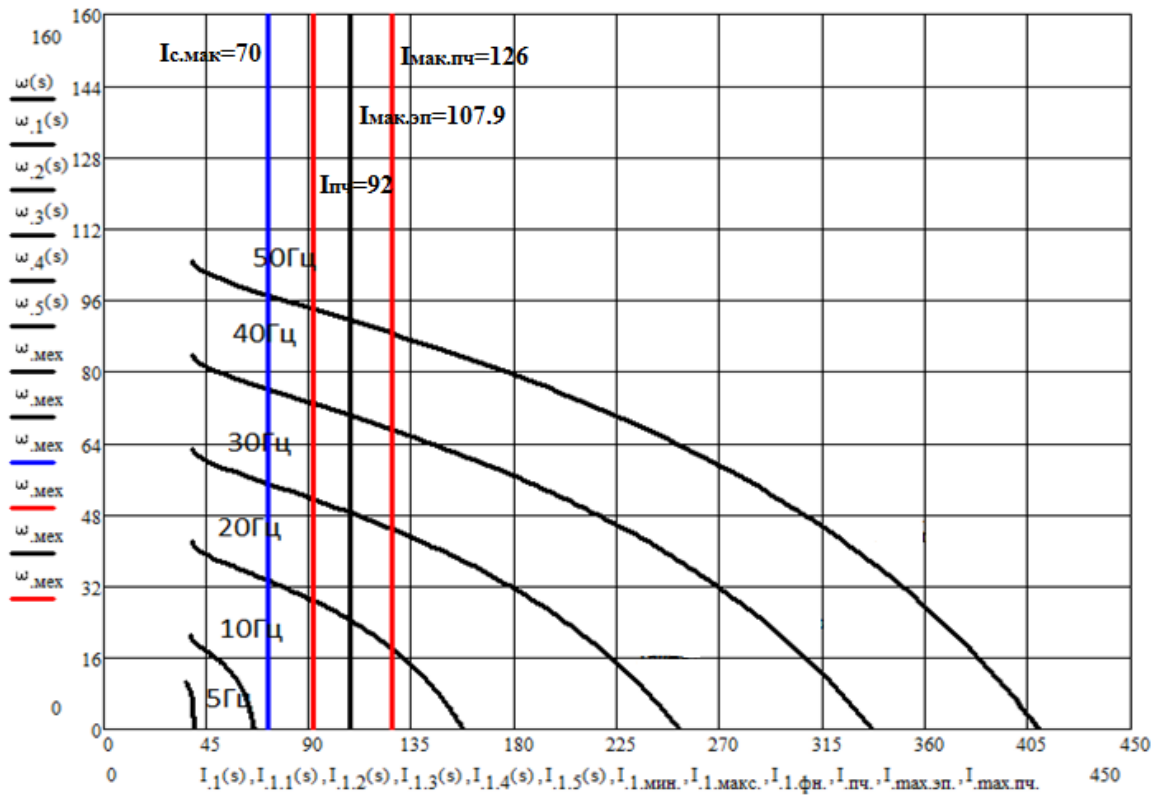


Рисунок 10 – Электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ системы преобразователь – двигатель при скалярном управлении и законе управления $U_1/f_1 = \text{const}$

3 Разработка и исследование моделей электропривода с учетом ШИМ напряжения

3.1 Разработка модели электропривода с учетом ШИМ напряжения инвертора

При учете ШИМ выходного напряжения инвертора предполагается синусоидальная система ШИМ управления инвертором с наложением третьей гармоники.

Справочные технические данные асинхронного двигателя приведены в таблице 1. Справочные и расчетные параметры двигателя приведены в разделах 2.2, 2.4 и 2.6, справочные параметры преобразователя частоты – в разделе 2.6.1, а механической системы электропривода – в разделе 2.3.

Имитационная модель регулируемого асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением реализуются на основе моделей асинхронного двигателя, трехфазного инвертора напряжения с ШИМ и механической системы (рисунки 11, 12, 13, 14 и 15).

Основными функциональными элементами регулируемого асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением в общем случае являются:

- модель двухфазного двигателя в неподвижной системе координат α, β в моделях электропривода без учета ШИМ;
- модель асинхронной машины Asynchronous Machine из библиотеки блоков SimPowerSystems Simulink – Matlab с коррекцией типового блока Mechanical model [часть 8];

– преобразователь частоты из библиотеки блоков SimPowerSystems
Simulink – Matlab;

– формирователь 6-канального ШИМ – сигнала;

– блок одномассовой механической системы;

– блок формирователя управлений, включающий в себя формирователи вольт-частотной характеристики $U_1(f_1)$, напряжений двухфазной системы

$$U_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \cdot U_1(f_{1\text{зад}}) \cdot \cos(2\pi \cdot f_{1\text{зад}} \cdot t),$$

$$U_{\beta}(t) = \sqrt{2} \cdot U_1(f_{1\text{зад}}) \cdot \sin(2\pi \cdot f_{1\text{зад}} \cdot t)$$

с максимальной амплитудой $U_m = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}}$, В, напряжений управления с единичной максимальной амплитудой двухфазным u_{α}^* , u_{β}^* или трехфазным u_a^* , u_b^* , u_c^* преобразователем;

– формирователь сигнала третьей гармоники U_{3f}^* ;

– задатчик интенсивности скорости с линейной или S-образной характеристикой;

– датчики в общем случае линейных токов двигателя;

– блок расчета фактического значения действующего фазного тока двигателя;

– элемент сравнения допустимого максимального и фактического значения действующего фазного тока двигателя и регулятор ограничения тока;

– блок IR-компенсации;

– блок компенсации скольжения – s-компенсации;

– блок коррекции (U_d -компенсатор) управлений инвертором в зависимости от напряжения звена постоянного тока U_d в моделях с учетом ШИМ.

Максимальное значение выходного напряжения двигателя зависит от напряжения питающей сети, нагрузки двигателя и выбранного способа широтно-импульсной модуляции. При пониженном напряжении сети возможно ограничение значения максимально достижимой скорости двигателя при номинальном значении потока.

Система управления электропривода формирует напряжения двухфазного двигателя U_α, U_β , частота и амплитуда которых зависит от заданной частоты $f_{1\text{зад}}(t)$, принятой вольт-частотной характеристики $U_1(f_1)$, работы блоков IR-компенсации, s -компенсации и регулятора ограничения тока РОТ.

Асинхронный электропривод с частным скалярным управлением имеет разомкнутую систему регулирования, управляется от задатчика частоты и задатчика интенсивности скорости, установленного на входе. Проблемой разомкнутых систем скалярного управления являются ограничение минимального значения заданной частоты $f_{1\text{зад мин}} \geq (2 - 5) \text{ Гц}$, отсутствие управления потоком двигателя и резонансные колебания двигателя в области частот менее 20 Гц. Отсутствие управления потоком затрудняет выбор оптимального соотношения U_1 / f_1 .

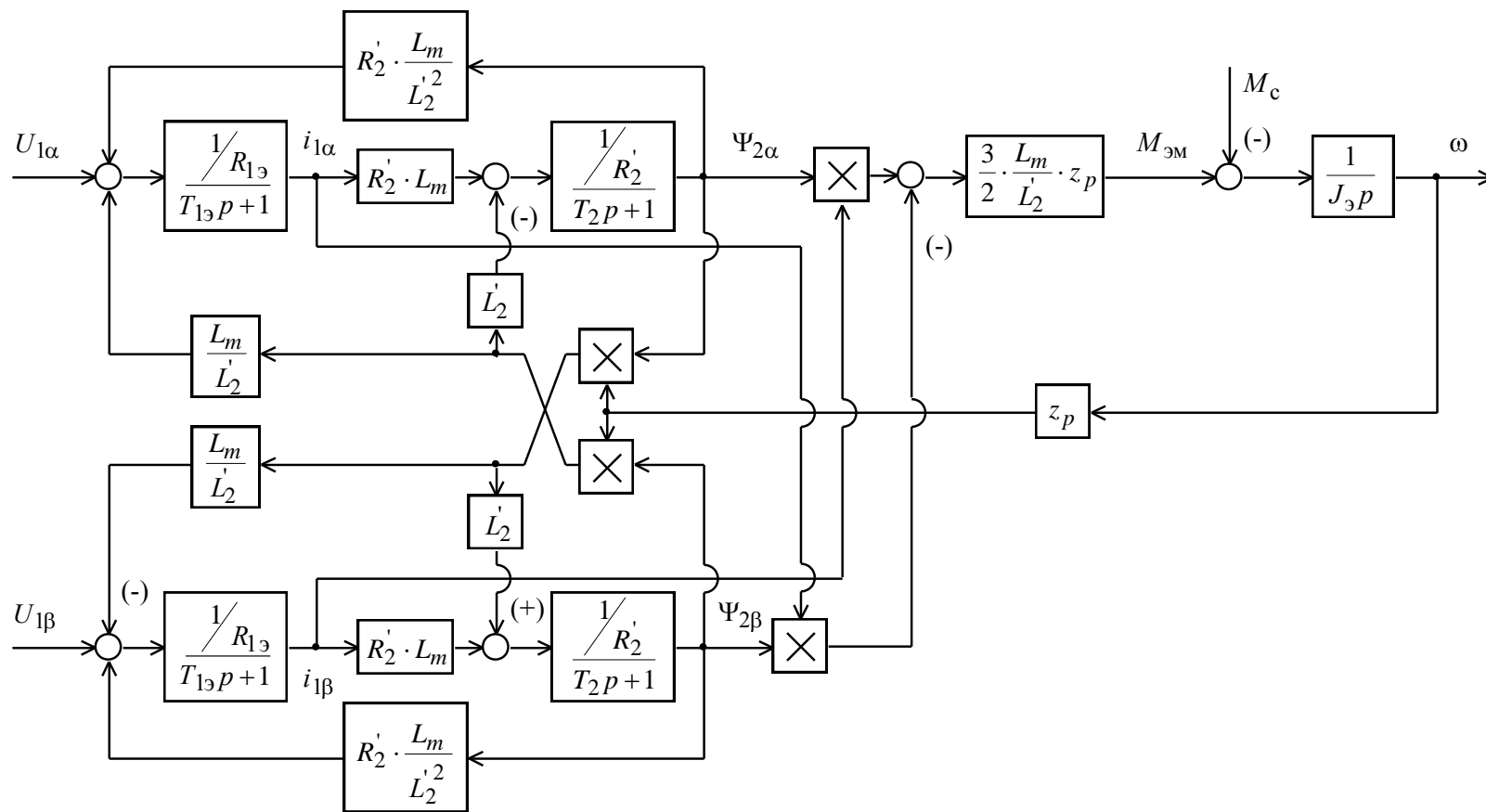


Рисунок 11 – Структурная схема двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора α, β

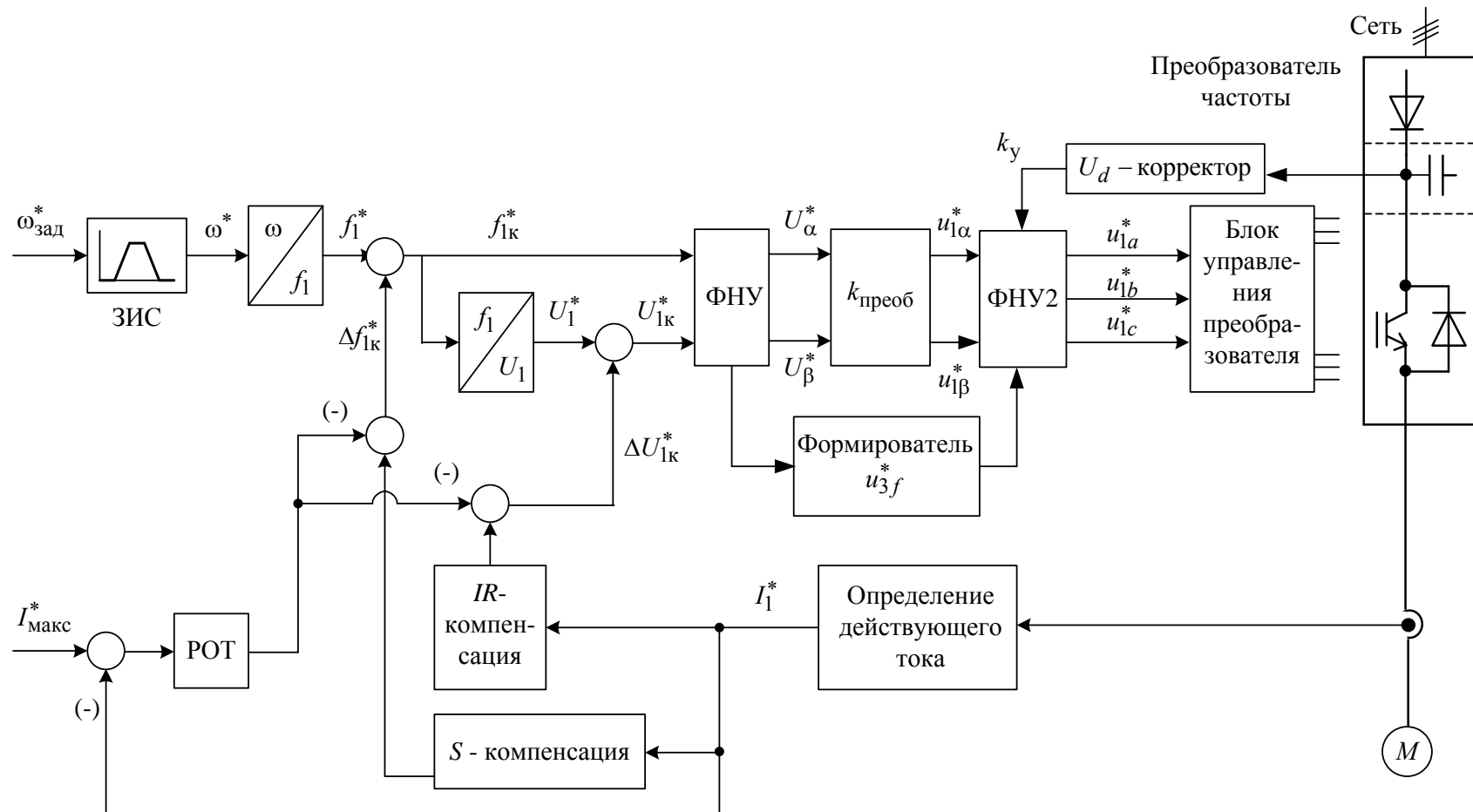


Рисунок 12 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением и моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ

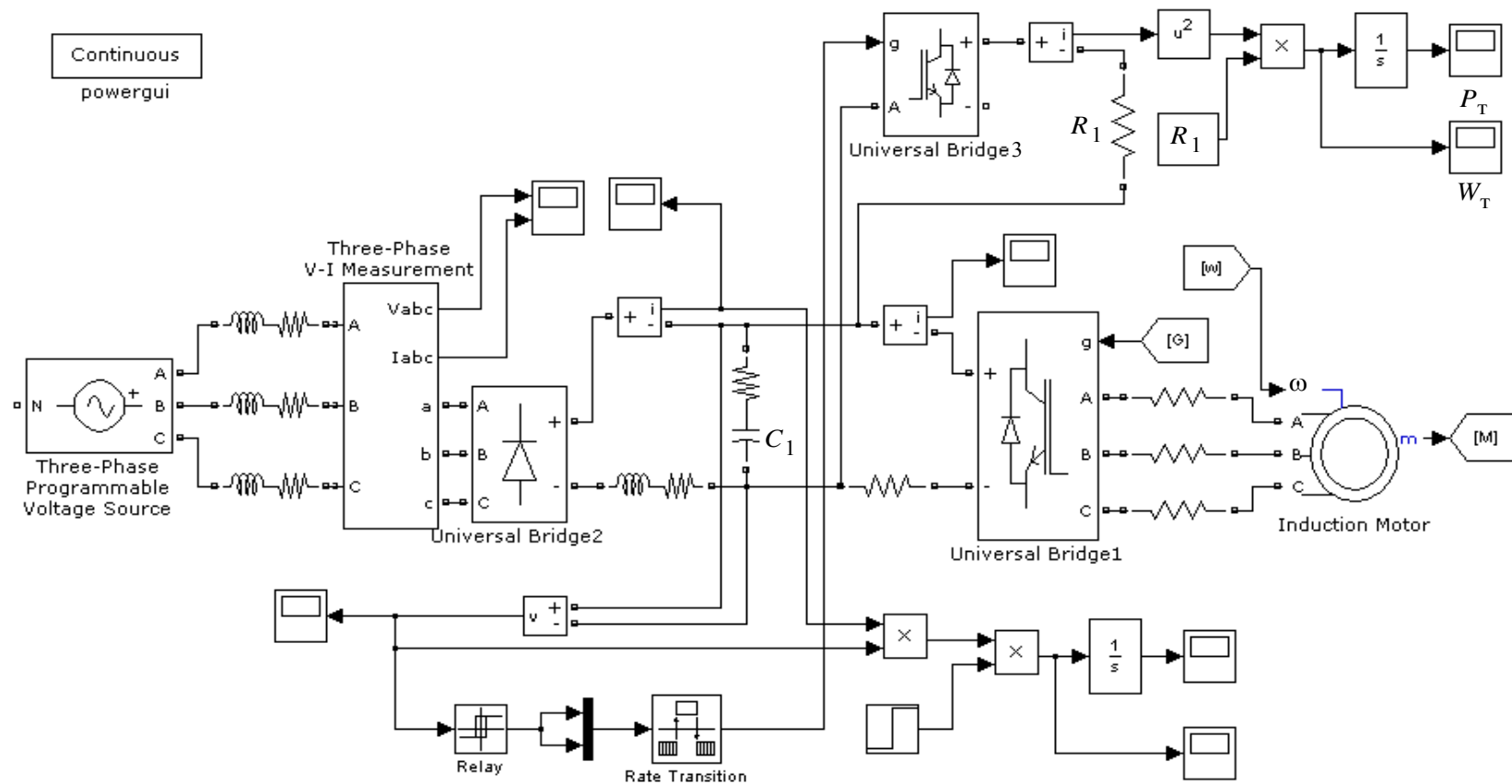


Рисунок 13 – Имитационная модель электрической части силового канала системы «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель»

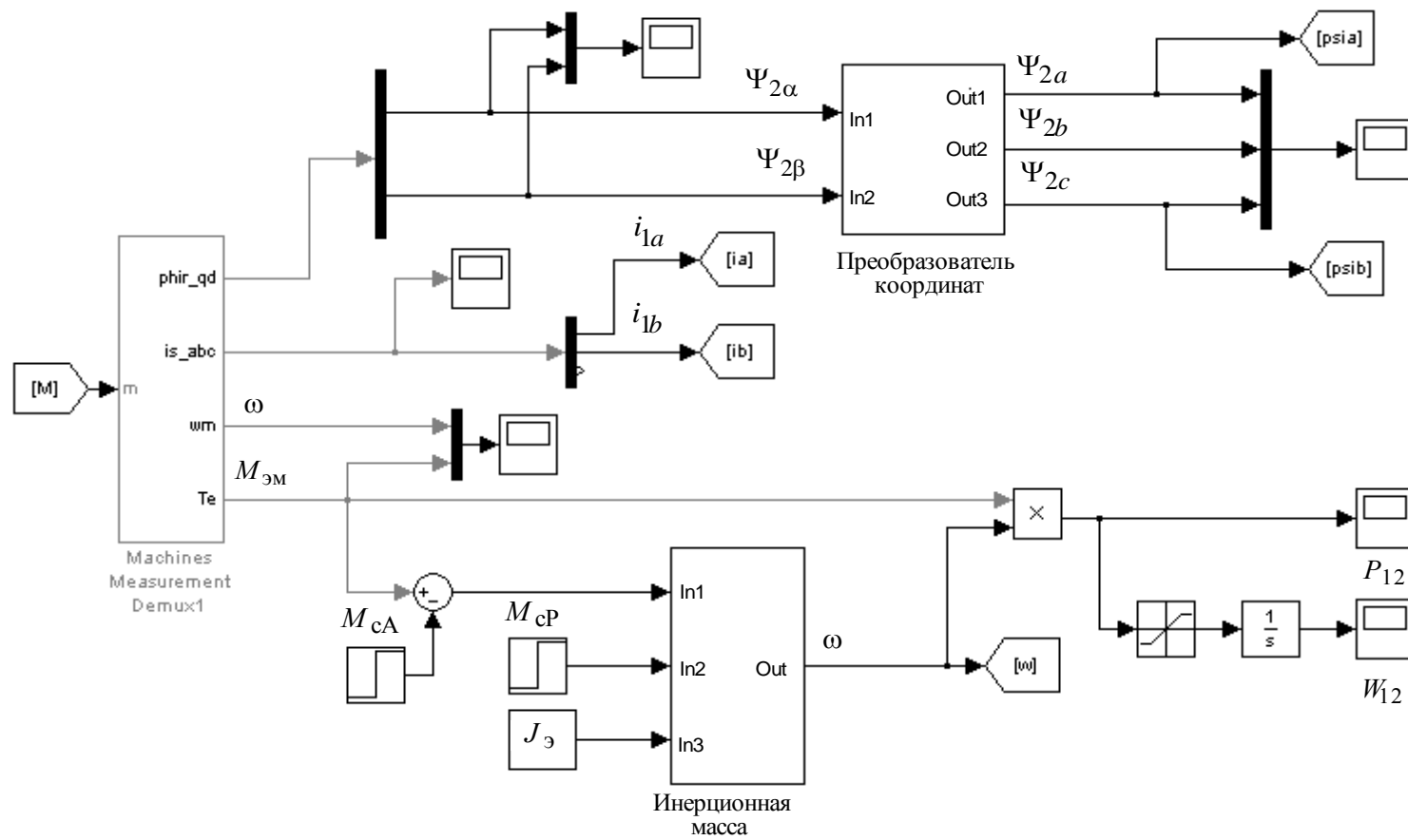


Рисунок 14 – Имитационная модель механической части силового канала системы
«преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель»

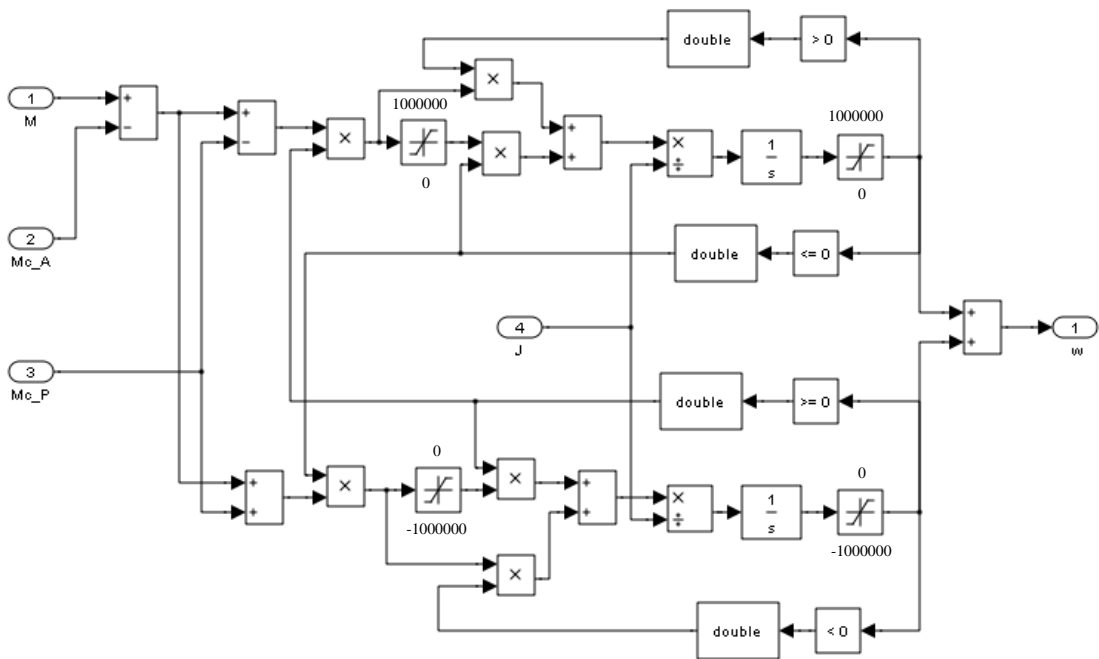


Рисунок 15 – Имитационная модель блока одномассовой механической системы с моментами нагрузки активного и реактивного характера

При разработке модели электропривода вместо стандартного аналогового сигнала управления $U_{\text{зад}} = 10 \text{ В}$ используется единичное воздействие $N_{\text{зад}} = 1$ в относительных единицах.

Параметры звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma} + X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0.115 + 5.547}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.018 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = \frac{X'_{2\sigma} + X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0.152 + 5.547}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.169 \text{ Гн}.$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0.018^2}{0.018 \cdot 0.169} = 0.893,$$

Где: $L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{5.547}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.018 \text{ Гн}$ – индуктивность,

обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре.

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} = 0.215 + 0.258 \cdot \frac{0.018^2}{0.169^2} = 0.46 \text{ Ом}.$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0.046 \cdot 0.018}{0.46} = 0.00182 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0.018}{0.258} = 0.07 \text{ с};$$

Параметры входной цепи и звена постоянного тока при учете ШИМ выходного напряжения инвертора

Параметры сетевого трансформатора или реактора выбираются в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4

$I_{рфн}, \text{ А}$	12.3	20.5	41	82	165	265	410	660	820
$L_p, \text{ мГн}$	3	2	1	0.5	0.25	0.156	0.1	0.064	0.05
$R_p, \text{ мОм}$	450	265	100	37	13	7.2	3.8	2.1	1.4
$I_{дн}, \text{ А}$	15	25	50	100	200	320	500	800	1000

При соединении обмоток статора двигателя в звезду номинальный ток обмотки фазы трехфазного трансформатора или реактора

$$I_{\text{рфн}} = I_{1\text{фн}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot U_{1\text{фн}}}{U_{\text{сн}}} = 69.79 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot 220}{380} = 73.3 \text{ А},$$

где коэффициент 1.05 учитывает падение напряжения на элементах цепи инвертор – двигатель.

$$\text{Принимаем } L_p = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad R_p = 0.037 \text{ Ом}.$$

Ёмкость конденсатора звена постоянного тока выбирается из условия

$$C \approx (100 \div 300) \cdot P_{\text{н}}, \text{ мкФ},$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

$$\text{Принимаем } C = 100 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Напряжения срабатывания ключа тормозного резистора:

– ключ закрывается при напряжении на конденсаторе звена постоянного тока $U_{\text{off}} > \sqrt{2} \cdot U_{\text{с макс}} = \sqrt{2} \cdot 1.1 \cdot 380 = 591.14 \text{ В};$

– ключ открывается при напряжении на конденсаторе $U_{\text{on}} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot U_{\text{off}} = 1.05 \cdot 591.14 = 620.7 \text{ В}.$

$$\text{Принимаем: } U_{\text{on}} = 630 \text{ В}; \quad U_{\text{off}} = 600 \text{ В}.$$

Параметры механической системы электропривода:

$$\Delta M_{\text{с дв}} = 26.418 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad \Delta M_{\text{с мех}} = 32 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{\text{с А мин}} = 28 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad M_{\text{с А макс}} = 300 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$J_{\text{э мин}} = 0.87 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad J_{\text{э макс}} = 0.93 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$k_j = \frac{J_{\text{э макс}} - J_{\text{э мин}}}{M_{\text{сА макс}} - M_{\text{сА мин}}} = \frac{0.93 - 0.87}{300 - 28} = 0.00022 \quad - \text{ коэффициент}$$

изменения момента инерции электропривода при изменении статического момента нагрузки.

3.2 Расчет параметров системы управления электропривода

Выбор вольт-частотной характеристики

Выбор вольт-частотной характеристики $U_1(f_1)$ определяется характером нагрузки, требуемым значением пускового момента и значением активного сопротивления обмотки фазы статора.

Необходимый диапазон изменения частоты при диапазоне регулирования скорости $D_\omega = 10$ определяется значениями:

$$f_{1 \text{ раб. мин}} \approx f_{1 \text{ н}} / D_\omega = 50 / 10 = 5 \text{ Гц};$$

$$f_{1 \text{ раб. макс}} = f_{1 \text{ н}} = 50 \text{ Гц}.$$

Для механизма подъемной лебедки с постоянным моментом нагрузки, значение которого изменяется в значительных пределах, выбираем закон регулирования

$$U_1(f_1) = \left(\frac{U_{1\text{фн}}}{f_{1\text{н}}} \right) \cdot f_1.$$

Учитывая, что момент нагрузки подъемной лебедки изменяется в значительных пределах, дополнительно применяем **IR**-компенсацию, а

для повышения жесткости характеристик при малых скоростях еще и компенсацию скольжения (s-компенсацию).

Настройка вольт-частотной характеристики

Для компенсации постоянной нагрузки выбираем вольт-частотную характеристику с коррекцией напряжения при малых частотах:

$$U_{1\text{кор}}(f_1) = \left(\frac{U_{1\text{фн}}}{f_{1\text{н}}}\right) \cdot f_1 + \Delta U_{1\text{кор}}(f_1).$$

Результирующая вольт-частотная характеристика задается в виде графической (по точкам) зависимости. При настройке вольт-частотной характеристики принимаем: принимать:

$$\Delta U_{1\text{кор.макс}} < R_1 \cdot I_{1\text{ф.н}} = 0.246 \cdot 69.79 = 17.17 \text{ В}.$$

$$f_{1\text{мин}} = 2 \text{ Гц}, \quad \text{из условия } f_{1\text{мин}} \leq f_{1\text{раб.мин}}, \quad f_{1\text{кор.мин}} = f_{1\text{мин}} = 5 \text{ Гц}$$

$$f_{1\text{кор.макс}} = 30 \text{ Гц}.$$

Скорректированная вольт-частотная характеристика формирователя фазных напряжений $U_1(f_1)$ преобразователя представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры вольт-частотной характеристики преобразователя

$f_1, \text{Гц}$	0	0.1	5	30	50	100
$U_{1\text{ф}}, \text{В}$	0	10	30	132	220	220

Настройка контура IR-компенсации

IR - компенсацию целесообразно применять для механизмов с переменным значением статического момента нагрузки, например, электропривод подъёмной лебедки.

Максимальное значение коэффициента положительной обратной связи при частоте $f_{1\text{кор.мин}}$

$$k_{IR\text{макс}} \approx (0.7 \div 0.85) \cdot R_1 = (0.7 \div 0.85) \cdot 0.246 .$$

В области больших частот значение коэффициента k_{IR} подбирается при настройке из условия $k_{IR}(f_1 > f_{1\text{кор.мин}}) < k_{IR\text{макс}}$.

Постоянная времени фильтра в цепи обратной связи

$$T_{IR} \geq \frac{4}{2\pi \cdot f_{1н} \cdot s_k} = \frac{4}{2\pi \cdot 50 \cdot 0.572} = 0.022 \text{ с.}$$

Характеристика блока IR-компенсации представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика блока IR-компенсации

$f_1, \text{Гц}$	0	2	30	50	100
$U_{1ф}, \text{В}$	$0.246 \cdot 0.7$	$0.246 \cdot 0.7$	0	0	0

Настройка контура компенсации скольжения (s-компенсация)

Компенсацию скольжения следует применять при необходимости повысить жесткость механических характеристик электропривода в нижней части диапазона регулирования скорости.

Минимальное значение коэффициента положительной обратной связи при номинальной частоте и нагрузке

$$k_{fl \text{ мин}}(f_{1H}) \leq (0.7 \div 0.85) \cdot \frac{f_{1H} \cdot s_H}{I_{1H}} = 0.8 \cdot \frac{50 \cdot 0.065}{69.79} = 0.03725.$$

В области малых частот значение коэффициента k_{fl} подбирается при настройке из условия $k_{fl}(f_{1\text{кор}}) > k_{fl \text{ мин}}(f_{1H})$.

Постоянная времени фильтра в цепи обратной связи

$$T_{fl} \geq \frac{4}{2\pi \cdot f_{1H} \cdot s_K} = \frac{4}{2\pi \cdot 50 \cdot 0.572} = 0.022 \text{ с.}$$

Характеристика блока s -компенсации представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристика блока s -компенсации

$f_1, \text{Гц}$	0	2	5	30	100
$U_{1\phi}, \text{В}$	0.037	0.037	0.03	0.01	0.01

Настройка контура ограничения тока

Циклическое обновление сигналов обратной связи по току (интервал времени $T_{\text{ос.т}}$) и выходных сигналов регулятора ограничения тока (интервал $T_{\text{пк.т}}$) выполняется последовательно в течение одного временного интервала ШИМ $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шим}}$.

Соответствующее обновление управления ключами инвертора происходит на следующем временном интервале ШИМ.

Установка сглаживающего фильтра в цепи обратной связи контура ограничения тока не желательна.

$$I_{\text{эп.макс}} = 1.5 \cdot I_{1\phi H} = 120 \text{ А.}$$

Принимаем $n_{\text{ащп. дт}} = 10$.

Принимаем $I_{\text{изм.макс}} = 200 \text{ А}$ из условия

$$I_{\text{изм.макс}} \geq \sigma_{\text{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}} = 1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot 140 = 186.7, \text{ где } \sigma_{\text{T}} > 1.1.$$

$$k_{\text{дт}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ащп. дт}}}}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{512}{200} \text{ 1/А.}$$

$$N_{\text{зт.макс}} = I_{\text{эп.макс}} = 120 \text{ А.}$$

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{I_{\text{изм.макс}}}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ащп. дт}}} \cdot \sqrt{2}} = \frac{200}{512 \cdot \sqrt{2}} \text{ А.}$$

$$k_{\text{T}} = \frac{N_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}} = 1 \text{ 1/А.}$$

Принимаем $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с.}$

Принимаем $T_{\text{ф.от}} = 0$.

Принимаем $n_{\text{T}} = 2$ из условия $n_{\text{T}} = (1 \div 3)$.

$$\text{Тогда } T_{\text{мтэ}} = n_{\text{T}} \cdot \frac{T_{\text{шим}}}{2} = 2 \cdot \frac{0.0002}{2} = 0.0002 \text{ с.}$$

Принимаем $a_{\text{T}} = 2$.

$$k_{\text{IU}} = \frac{1}{R_{1э}} = \frac{1}{0.466} \text{ А/В.}$$

$$T_{\text{рот}} = T_{1э} = 0.002 \text{ с.}$$

$$k_{\text{рот}U} = \frac{T_{1э}}{k_{IU} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\text{мтэ}}} = \frac{0.002 \cdot 0.466}{1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0002} = 2.33.$$

3.3 Исследование электропривода методом компьютерного моделирования

Основные требования к электроприводу:

- диапазон регулирования скорости не менее 10:1;
- обеспечить плавный пуск и останов механизма;
- реверсирование должно осуществляться с остановкой механизма на нулевой скорости;
- во время паузы должен быть наложен тормозной момент.

Исследования электропривода должны включать следующие режимы работы электропривода производственного механизма:

- пуск для двух направлений вращения вала двигателя до любой скорости и при любом значении активного момента нагрузки в заданных диапазонах изменения;
- торможение при любом значении начальной скорости и нагрузки до нулевой скорости.

Исследования электропривода выполняются в режиме отработки следующего типового рабочего цикла механизма подъемной лебедки: «Плавный пуск в режиме подъема или спуска на малую рабочую скорость – работа на малой рабочей скорости – плавный пуск до промежуточной рабочей скорости – работа на промежуточной рабочей скорости – плавный пуск до максимальной рабочей скорости – работа на максимальной рабочей скорости – плавное торможение до промежуточной рабочей скорости – плавное торможение до начальной

малой рабочей скорости – работа на малой рабочей скорости – останов – пауза». Во время паузы накладывается тормоз. Рабочий цикл исследуется в режимах подъема и спуска при разных значениях нагрузки $M_{сА}$. Реверсирование должно осуществляться с остановкой механизма на нулевой скорости.

При прямом пуске двигателя имеют место большие пусковые токи и момент двигателя и колебательный характер переходного процесса, что недопустимо для двигателя, преобразователя и производственного механизма (рисунок 15). Введение контура ограничения тока позволяет ограничить ток двигателя и преобразователя (в данном случае на уровне $I_{эп.макс} = 1.5 \cdot I_{1фн} = 120 \text{ А}$), однако перегрузки по моменту и колебательность процесса пуска двигателя сохраняется (рисунок 16). Для обеспечения плавности процессов пуска и торможения механизма электроприводом будем управлять от задатчика интенсивности скорости с полным временем пуска 2 секунды.

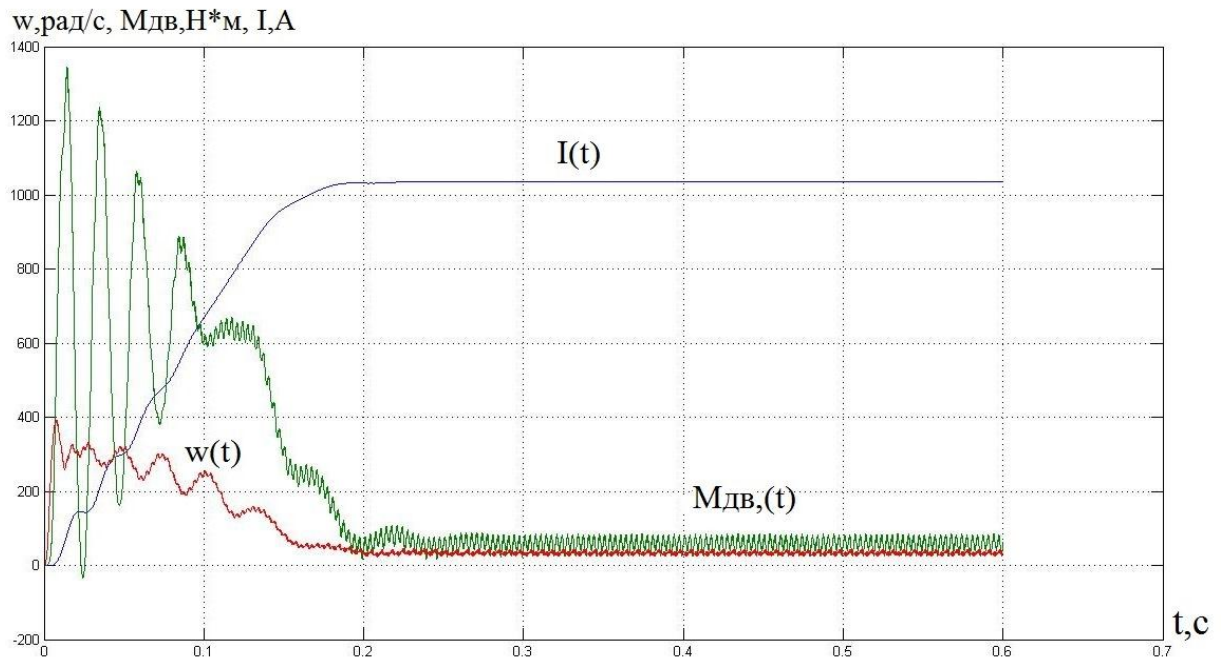


Рисунок 15 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при прямом пуске двигателя на холостом ходу

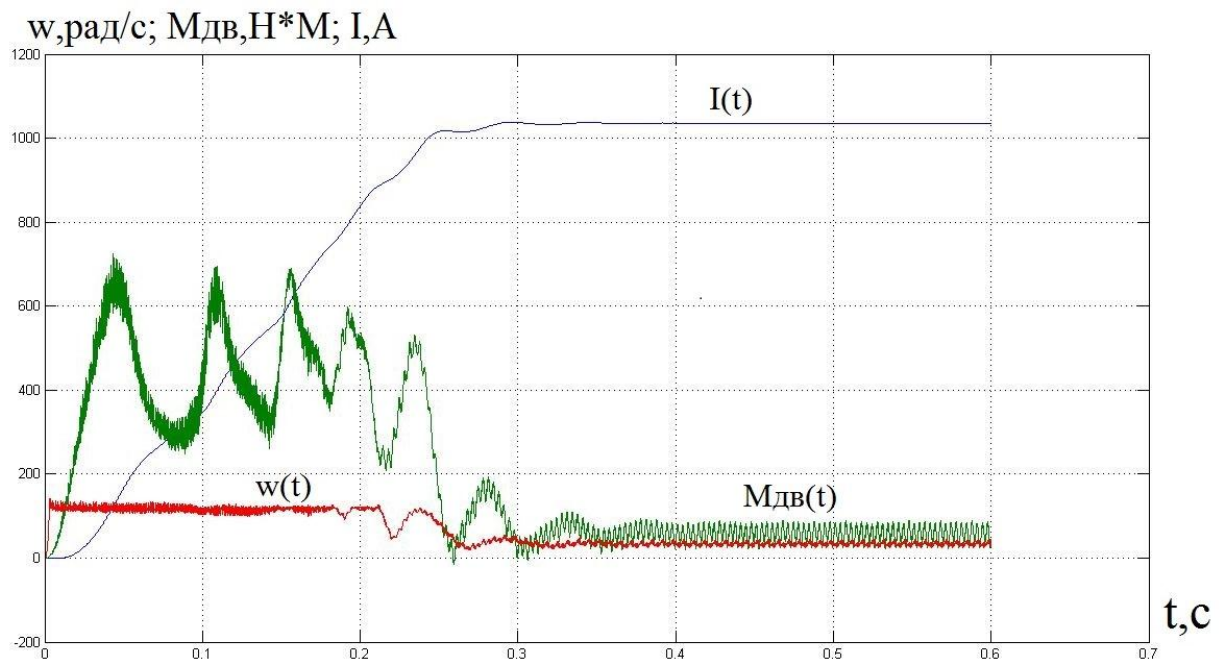


Рисунок 16 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при прямом пуске двигателя и ограничении тока двигателя на холостом ходу

На рисунках 17 – 24 приведены диаграммы изменения действующего фазного тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{дв}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя электропривода, соответственно, при отработке рабочих циклов подъема и спуска без груза и с максимально тяжелым грузом. В режиме спуска груза потенциальная энергия масс груза преобразуется электрической машиной в электрическую и выделяется в тормозном резисторе $R_{дт} = 10\text{Ом}$ (рисунок 22), предотвращая рост напряжения на конденсаторе звена постоянного тока (рисунок 23).

Проведенные исследования имитационной модели электропривода подъёмной лебедки позволяют сделать следующий вывод. Асинхронный электропривод с частотным скалярным управлением имеет удовлетворительные регулировочные свойства, что позволяет регулировать скорость вращения двигателя в широких пределах и обеспечить диапазон регулирования скорости не менее чем 10:1, формировать переходные процессы с ограничением ускорения и рывка, ограничить максимальный момент двигателя. Недостатком электропривода с частотным скалярным управлением является невозможность его работы при нулевой скорости, когда при неподвижном роторе двигатель развивает на валу движущий или тормозной момент, равный выбранному максимальному значению.

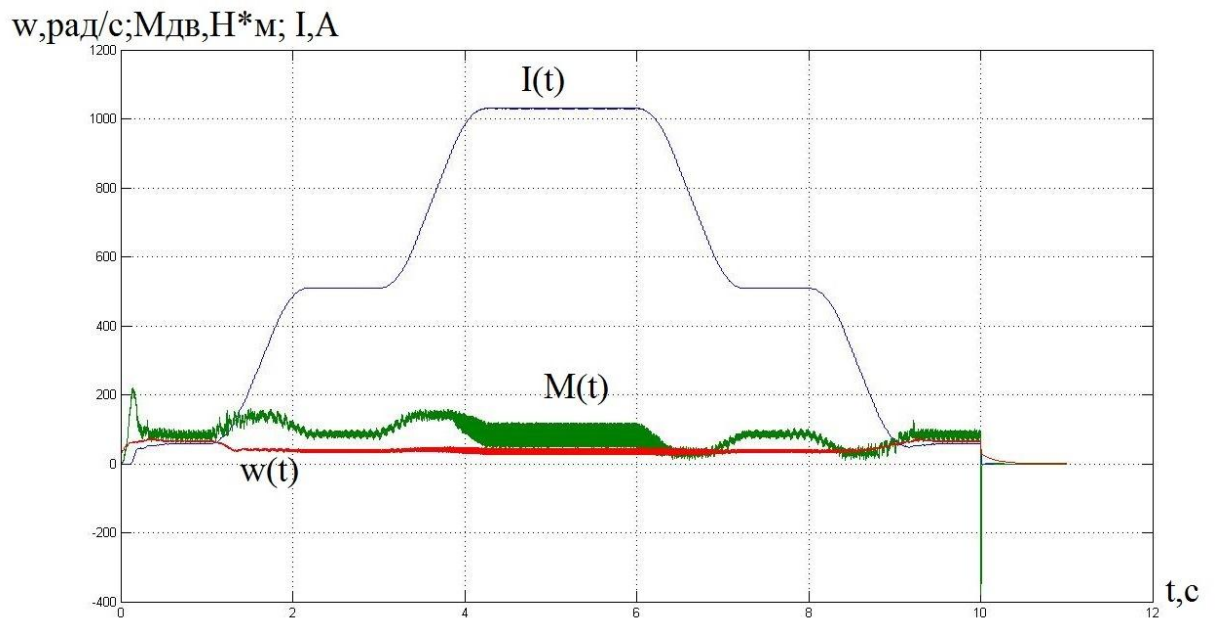


Рисунок 17 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при обработке электроприводом типового цикла подъема без груза

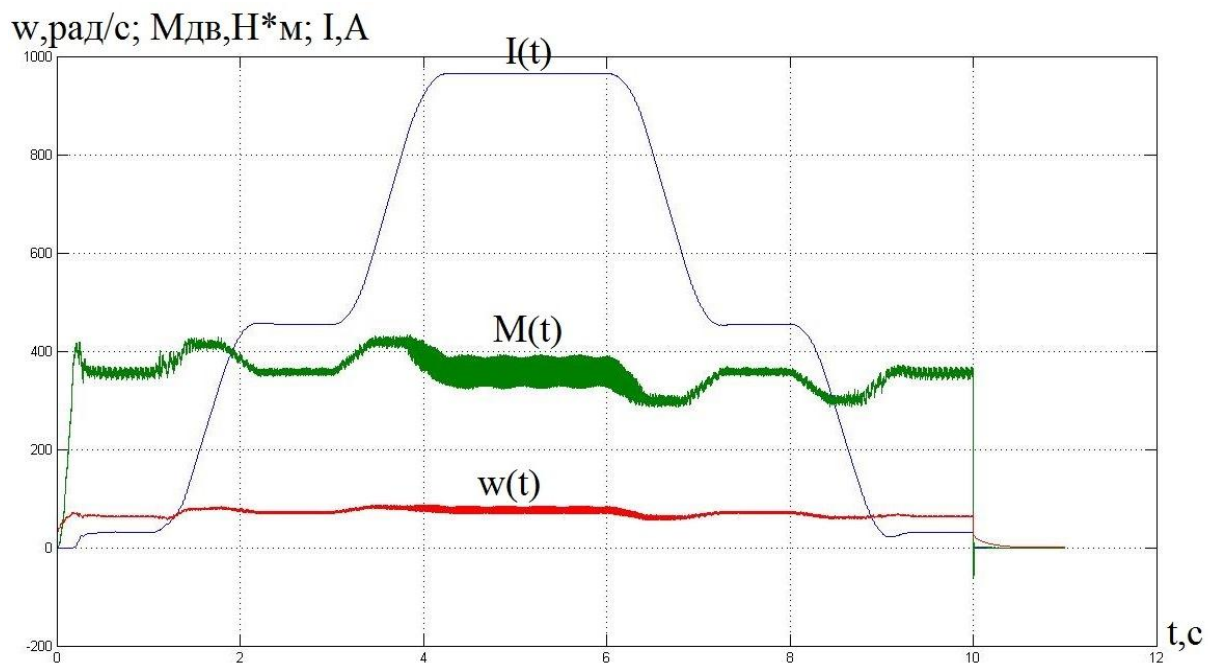


Рисунок 18 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при обработке электроприводом типового цикла подъема с максимальным грузом

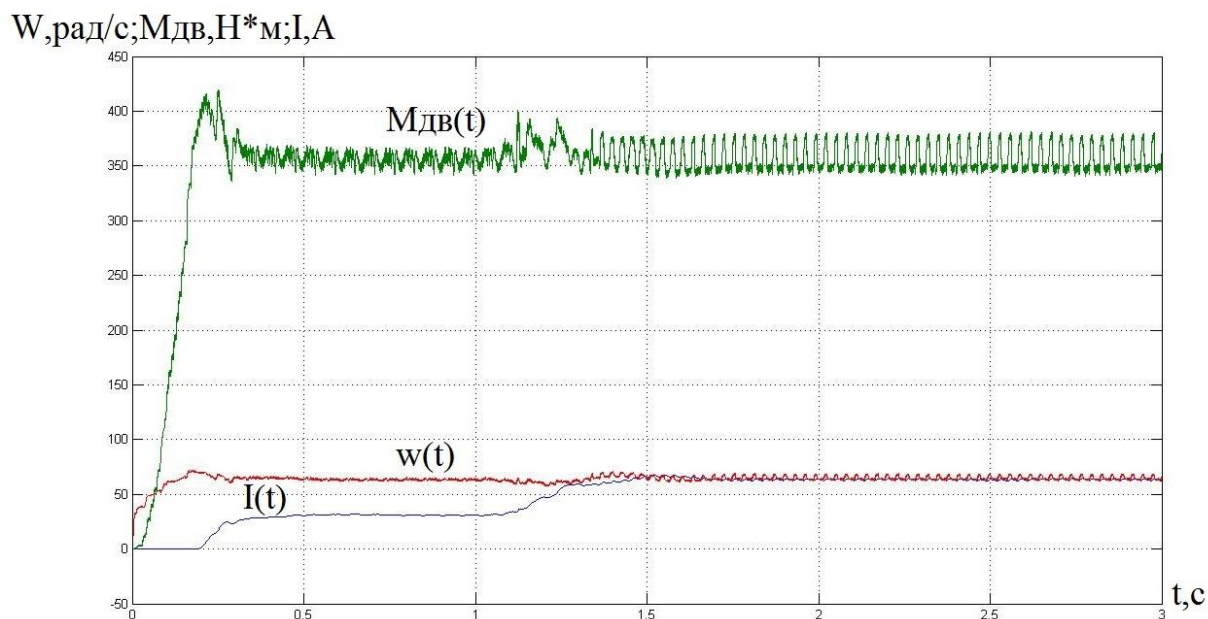


Рисунок 19 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при пуске и работе электроприводом на подъем с максимальным грузом и минимальной рабочей частоте $f_{1зад} = 5$ Гц

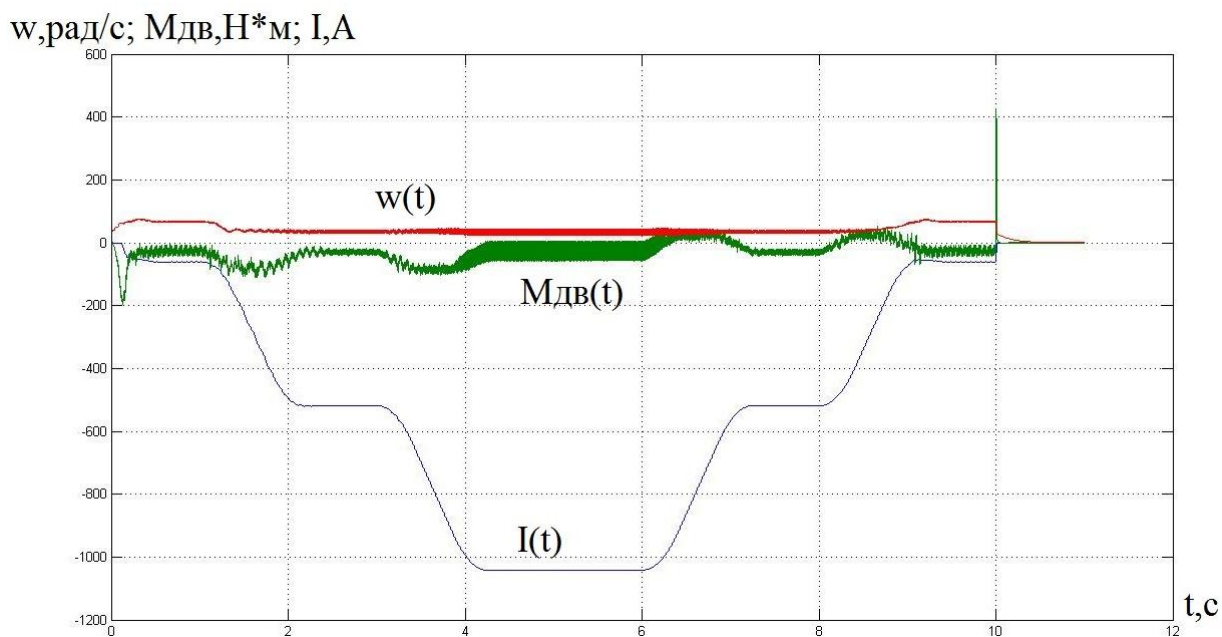


Рисунок 20 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при отработке электроприводом типового цикла спуска без груза

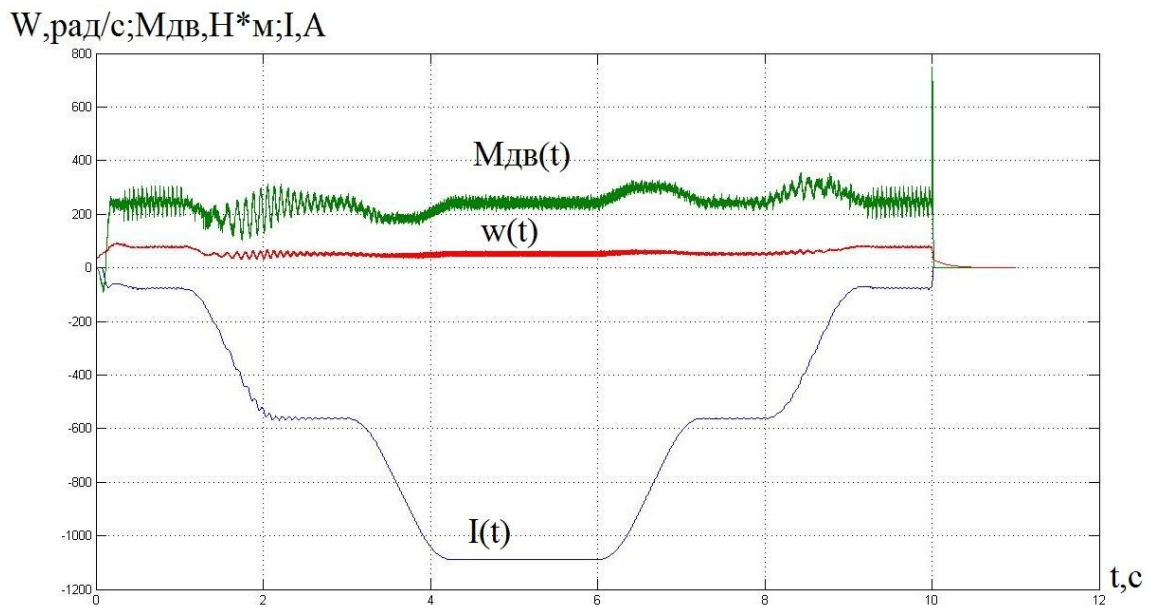


Рисунок 21 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при обработке электроприводом типового цикла спуска с максимальным грузом

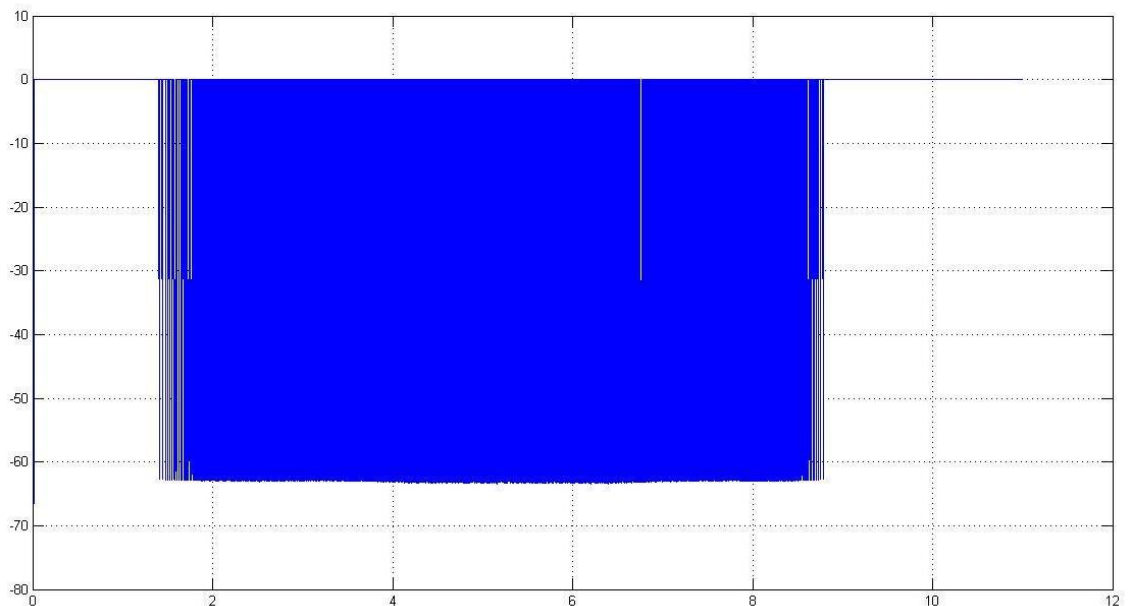


Рисунок 22 – Диаграммы тока I_{RT} (A), мощности P_{RT} (кВт) и принимаемой энергии W_{RT} (кВт·с) тормозного резистора при обработке электроприводом типового цикла спуска с максимальным грузом

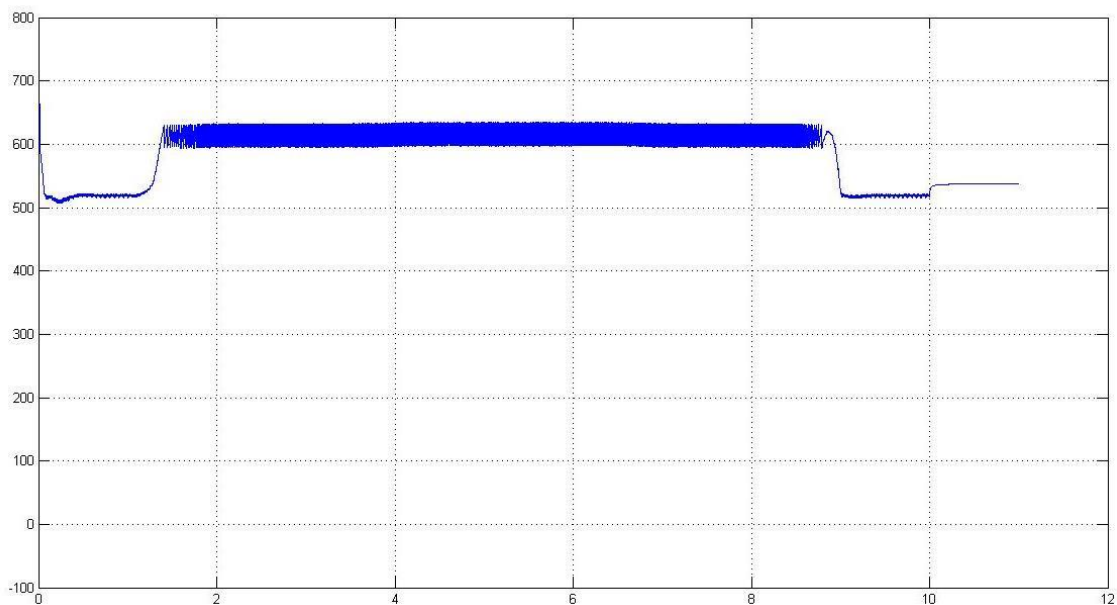


Рисунок 23 – Диаграмма напряжения конденсатора звена постоянного тока U_d (В) при отработке электроприводом типового цикла спуска с максимальным грузом

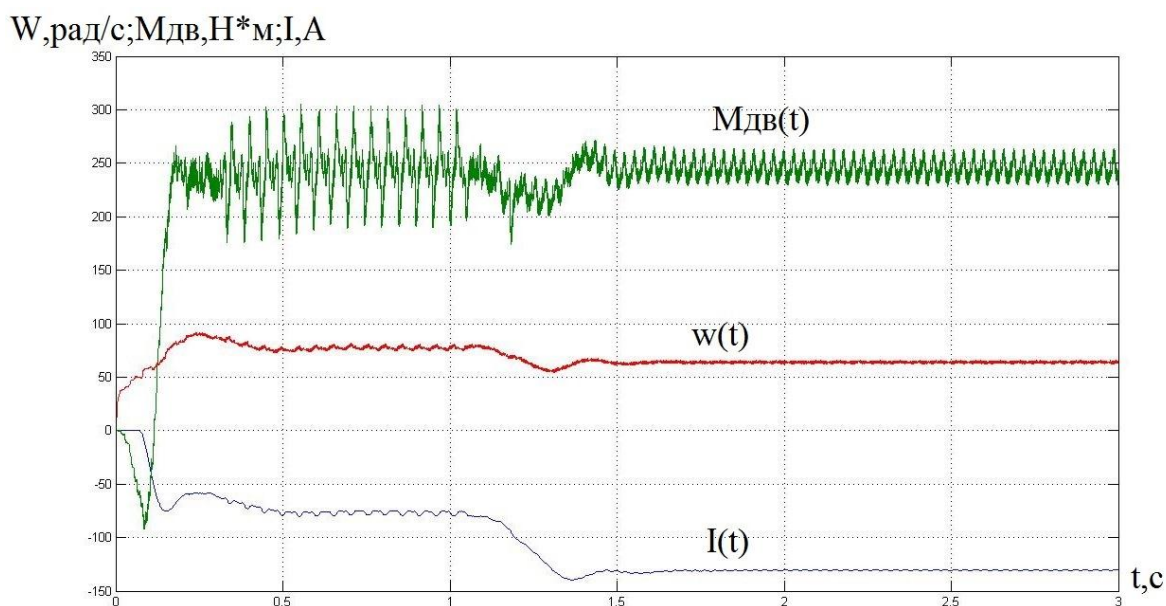


Рисунок 24 – Диаграммы действующего тока $I_{1\phi}$, электромагнитного момента $M_{эм}$ и скорости ω двигателя при пуске и работе электроприводом на спуск с максимальным грузом и минимальной рабочей частоте $f_{1зад} = 5$ Гц

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательской работы (НИР).

Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач:

- произвести технико-экономическое обоснование проекта;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- рассчитать бюджет НИР;
- произвести оценку ресурсной и экономической эффективности проекта.

4.1 Инициализация проекта и определение его потенциальных потребителей

Большинство промышленных предприятий, которые активно используют электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с некоторыми проблемами, одна из проблем это несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. В кранах, которые изготавливаются серийно и находятся в эксплуатации, привод главного подъемного крана осуществляется двигателями постоянного тока с системой регулирования от полупроводниковых преобразователей или асинхронными двигателями с фазным ротором с параметрическим регулированием при помощи изменения сопротивления резисторов, подключаемых к контактным кольцам фазного ротора. Используемое для изменения скорости реостатное регулирование отличается очень низкой энергетической эффективностью. По некоторым данным в электроприводах механизмов подъема до 70 % потребляемой электроэнергии может уходить на обогрев воздуха, причем не только при спуске, но и при подъеме груза.

Подавляющее большинство грузоподъемных кранов оборудовано недорогой и привычной для обслуживания системой управления электроприводом на базе релейно–контакторных панелей, которая очень далека от совершенства, характеризуется зависимостью скорости опускания груза от его массы, негативно влияет на ресурс работы механической части крана и требует значительных расходов по поддержанию работоспособности.

Среди направлений повышения эффективности использования кранового оборудования можно выделить два основных: достаточно большое снижение энергопотребления и повышение надежности. Использование частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может решить обе задачи достаточно невысокими затратами и является на сегодняшний день наиболее эффективным способом модернизации кранового оборудования. Преимуществами применения частотно-регулируемого электропривода по сравнению с другими схемами управления двигателями являются:

- повышение качества и значительная рационализация системы управления;
- автоматическое передвижение груза по заданной программе, т.е. введение крана в систему АСУ ТП;
- возможность согласованного действия нескольких кранов по заданной программе, например при монтажно-сборочных работах;
- увеличение надежности и срока службы как самого привода, так и всех его механизмов;
- экономия электроэнергии;
- создание предпосылок для дальнейшего совершенствования как самих кранов, так и систем управления: введение дистанционного управления, ликвидация приборов контроля грузоподъемности, снижение передаточного отношения редуктора, ликвидация полиспастов и т.д.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер
	6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер
	7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	8	Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	Инженер
	9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Инженер
	10	Оптимизация САР электропривода	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

4.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{p_i} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.4 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу (табл. 15).

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел-дней};$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 116 - 14} = 1,553;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,553 = 3,106 \approx 4 \text{ дня}.$$

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{\min} , чел-дни		t_{\max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП		4		9		6		6		10
Расчет параметров двигателя и модели		4		6		5		5		8
Выбор способа регулирования скорости		2		4		8		8		12
Расчет предельных характеристик системы		2		4		3		3		5

«преобразователь– электродвигатель»										
Разработка математической модели системы АУ ЭП	3		6		5		5		8	
Оптимизация САР электропривода		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3			3		3	5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки (эксплуатационно- технической документации)		1		3		2		2		4

№ ра бо т	Вид работ	Исполнит ели	T к _i · кал · дн.	Продолжительность выполнения работ												
				фев р.		март			апрель			май			июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководи тель	4													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11													
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7													
4	Календарное планирование работ по теме	Руководи тель	7													
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10													
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8													

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.6 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл..

Таблица 10 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	7200
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	1523
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7	1523
4	Календарное	Руководитель	7	2351

	планирование работ по теме			
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10	1523
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8	1523
7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер	12	1523
8	Расчет предельных характ. системы «преобр.– электродвиг.»	Инженер	5	1523
9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Руководитель	3	2351
10	Оптимизация САР электропривода	Инженер	10	1523
11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер	11	1523
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	2351
13	Технико-экономические расчеты	Инженер	8	1523
14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8	1523
15	Составление пояснительной записки	Инженер	4	1523

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 15);

$$Z_{\text{м.рук.}} = t_{\text{раб.}} \cdot T_{\text{рук}} = 24 \cdot 300 = 7200 \text{ руб}$$

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 53594 \text{ руб}$$

где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{ТС}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{\text{ТС}}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл..

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р}$, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель								7200
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	95	144685
Итого $Z_{осн}$								151885

4.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 144685 = 17362 \text{ руб}$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

4.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,302 \cdot (144685 + 17362) = 43914 \text{ руб}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (табл13.).

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	7200	-
Студент-дипломник	144685	17362
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого		
Руководитель	2174,4	
Инженер	43914	

4.9 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ = (151885 + 17362 + 43914) \cdot 0,16 = 34105,76 \text{ руб.}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	151885
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	17362
3. Отчисления во внебюджетные фонды	43914
4. Накладные расходы	34105,76
5. Бюджет затрат НИИ	247266,76

5 Социальная ответственность

Социальная ответственность - сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач, норм и ценностей, понимание последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

В данном разделе рассматриваются безопасность и экологичность лаборатории где исследуется и проверяется синхронный электропривод дверей кабины лифта. Здесь будет рассмотрено необходимое обеспечение условий труда в лаборатории (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы экологической безопасности.

Безопасность включает в себя влияние опасных и вредных факторов, их анализ и меры их профилактики.

5.1 Производственная безопасность

Технологический процесс разработки и проверки системы управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов заключается в следующем:

- Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике. На основании этого пункта создается и строится математическая модель синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) в наиболее применимой форме для дальнейших исследований.
- Создание метода разработки системы управления для СДПМ.
- Компьютерное моделирование системы управления.
- Анализ полученных результатов моделирования.
- Проверка разрабатываемой системы управления на реальном двигателе.
- Анализ полученных результатов проверки.

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- исследуемый синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов;
- шкаф диагностики и управления;
- преобразователь частоты;
- пользовательский компьютер;
- монитор.

Оборудование находится в помещении площадью 40 м², имеющим один выход и 2 окна.

5.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе разработки и проверки системы управления СДПМ.

Лаборатория в которой проводится исследование электрического привода, по опасности поражения электрическим током относится к помещениям без повышенной опасности. Поскольку в данном помещении отсутствует условия, создающие повышенную или особую опасность, такие как: сырость; токопроводящая пыль; высокая температура; возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, имеющим соединение с землей, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования (открытым проводящим частям), с другой; химически активная или органическая среда.

В связи с тем, что основные работы при проверке метода проводятся с рабочими электрическими установками, таким как двигатель и преобразователь частоты, то основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током. Для снижения уровня

опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании [1-5].

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим синхронным двигателем в режиме холостого хода и при нагрузке, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Для снижения риска получения травмы устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

Изолирующие средства – основные и дополнительные – обеспечивают электрическую изоляцию человека от токоведущих или заземленных частей оборудования и земли. В электроустановках до 1000В к основным изолирующим средствам относятся диэлектрические перчатки, изолирующие и токоизмерительные клещи, монтерский инструмент с изолирующими рукоятками, токоискатели, к дополнительным – диэлектрические галоши, коврики, изолирующие подставки.

5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Часть технологического процесса разработки и проверки системы управления СДПМ основана на работе с двигателями, которые в свою очередь являются источниками повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [7]. Для уменьшения влияния данного фактора применяются технологические и конструктивные меры, такие как: замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Однако такие меры слишком затратные и трудоемкие. Другими решениями проблемы являются: использование звукопоглощающих материалов ограждения и отдельных частей установки, в нашем случае защитного

кожуха. Также возможно закрытие звукоизолирующими кожухами всей установки. Последнее мероприятие является эффективным, но может плохо сказаться на всем технологическом процессе, так как необходим постоянный и легкий способ контакта с установкой.

Опасность может представлять повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо осуществить жесткую фиксацию рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов .

Еще одними вредоносными факторами, оказывающими влияние на окружающую среду при работе системы, являются излучения, связанные с функционированием аппаратных модулей работающего компьютера и преобразователя. В основном это электромагнитное излучение и статическое электричество.

Для защиты от вредного воздействия излучений возможно применение различных защитных экранов. Так же используются мониторы, которые соответствуют спецификации MPR II, которая разработана Шведским Национальным Советом по измерению и тестированию. В нашем случае уровень электромагнитного излучения для нижней полосы (5 Гц – 2 кГц) не превышает 25 В/м, так же и для верхней полосы (2 – 400 кГц) превышения 2,5 В/м нет. Соответственно напряженность магнитного поля не превышает 2,5 нТл [12].

Напряженность электростатического поля менее 20 кВ/м, так как источники имеют заземление [13, 14].

Так как оборудование установлено в помещении, то излучения гасятся конструктивными элементами (стенами, окнами) и не выходят за пределы здания, и, соответственно, не оказывают вредное экологическое воздействие на окружающую среду.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света [1], в связи с расположением рабочего места в подвальном помещении. Данный фактор более психологический, чем физиологический, соответственно решение – это набор сотрудников с высоким психоустойчивым порогом или с опытом работы в таких условиях.

Однако, недостаток освещенности рабочей зоны и лаборатории в целом плохо сказывается на здоровье работника [1,8]. Для улучшения ситуации, необходимо установить светильники на основании следующего расчета:

Данные, необходимые для расчета искусственного освещения:

- длина помещения $A_{\text{пом}} = 8 \text{ м};$
- ширина $B_{\text{пом}} = 6,5 \text{ м};$
- высота $H_{\text{пом}} = 3 \text{ м};$
- коэффициент отражения стен $R_c = 30\%;$
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,5 \text{ м};$
- коэффициент отражения потолка $R_n = 50\%;$
- коэффициент запаса $k = 1,5;$
- коэффициент неравномерности $Z = 1,1.$

Требуется создать освещенность $E = 300$ люкс.

Рассчитаем систему общего освещения (люминесцентного).

Выбираем светильники типа ОД с $\lambda = 1,4.$

Принимаем свес $h_c = 0,1$ метр, тогда расчётная высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = H_{\text{пом}} - h_c - h_p = 3 - 0,1 - 0,5 = 2,4 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,4 = 3,36 \text{ м.}$$

Расстояние от несущих стен до светильников:

$$\frac{L}{3} = \frac{3,36}{3} = 1,12 \text{ м.}$$

Светильники размещаем в два ряда. В каждом из рядов будет установлено 4 светильника типа ОД. Мощность светильника 40 ватт, длина 1,230 метра. Разрывы между светильниками, которых будет 3 в ряду, составят 28 сантиметров. План размещения светильников представлен на рисунке 25. В каждом светильнике установлено по две лампы, соответственно общее число ламп в помещении $n = 16$.

Найдем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 6,5}{2,4 \cdot (8 + 6,5)} = 1,49.$$

Тогда, коэффициент использования светового поток равен $\eta = 0,5$.

Рассчитаем световой поток:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 52 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,5} = 3217,5 \text{ лм.}$$

Определим потребный световой поток ламп в ряду. Для этого выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛД 65 Вт со световым потоком 3750 люмен. Делаем проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{3750 - 3218}{3750} \cdot 100 \leq 20\%$$

Получаем:

$$-10\% \leq 14,19\% \leq +20\% \text{ – условие выполнено.}$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 16 \cdot 40 = 640 \text{ Вт.}$$

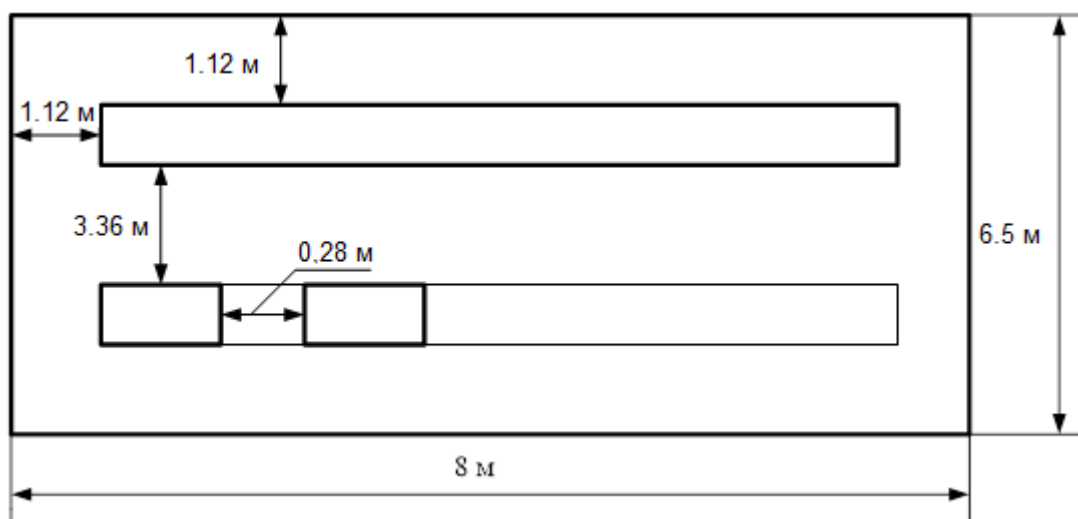


Рисунок 25 – План размещения светильников с люминесцентными лампами

Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещенностью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки [1]. Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видимые цвета.

Последствие наличия теплоотдающих элементов установки будет повышенной температура воздуха рабочей зоны [9], которая пагубно влияет на состояние человека. Выход – установка вентиляционной системы и системы кондиционирования.

5.4 Экологическая безопасность

При работе самых разных устройств имеет место загрязнение окружающей среды. Все эти приборы могут оказывать влияние на атмосферу и гидросферу, выделять тепло и разного рода излучения.

Рассмотрим факторы загрязнения при использовании установок, применяемых при работе данного проекта:

- тепловое загрязнение;
- твердые отходы.

При эксплуатации объекта установлены основные виды воздействий проектируемого объекта: физическое наличие объекта (сооружение и эксплуатация объекта) влияет на гидрологию, климат, социально-экономические условия жизни, природопользование местного населения:

- Химические вещества, пыль, твердые бытовые отходы загрязняют компоненты окружающей среды (воздух, воду, водные биоресурсы, почвы, растительность), воздействуют на биопродуктивность водоемов и здоровье населения;
- Шум, вибрация, электромагнитное излучение воздействуют на компоненты окружающей среды;
- Динамическое воздействие движущихся машин и механизмов на людей, животных, растительность, почву.

Мероприятиями по снижению интенсивности загрязнения атмосферного воздуха, создание препятствий на пути распространения и их очисткой разными методами:

Физико-химическими – для сварочных работ применение устройств для сбора и очистки газов (местных отсосов).

Биологическими – сохранение и создание полос озеленения вокруг объекта.

Воздействие на гидросферу.

Ведется систематическая работа по сокращению загрязнения сточных вод и общих объемов водопотребления и водоотведения, а так же проводится очистки загрязненных и ливневых сточных вод.

Мероприятиями по снижению негативного шумового воздействия являются сохранения природных и создание искусственных препятствий для снижения уровня шума. При складировании (утилизации) отходов промышленного производства выявляются источники образования отходов

потребления и производства, мероприятия по их утилизации. К таковым источникам относятся горюче-смазочные материалы, металлолом, бытовые отходы. В качестве мероприятий по утилизации всех видов отходов предусматривается их вывоз на площадки хранения ТБО, повторная переработка ГСМ и металлолома.

5.5 Тепловое излучение

В персональных компьютерах нового поколения выбросы тепловой энергии значительно меньше, чем в самых первых ЭВМ, но все же имеют место. Основными источниками теплового загрязнения при работе персональных компьютеров являются:

- кристалл центрального процессора;
- кристаллы микросхем ОЗУ;
- кристаллы контроллеров материнской платы;
- кристалл графического процессора видео карты;
- блок питания;
- винчестер.

Значительное тепловое излучение производит и преобразователь частоты.

Для уменьшения тепловых выделений установлены вентиляторы и радиаторы.

5.6 Утилизация твердых отходов

Разработанный проект предусматривает применение вычислительных устройств. Данные устройства предусматривают в среднем 7 лет работы, после чего они подвергаются списыванию и утилизации. Утилизация ЭВМ является обязательным условием, которое прописано в российском законодательстве. Под него попадают как организации, так и физические лица. Необходимость в профессиональной утилизации оргтехники возникает в связи с тем, что внутри микросхем содержатся драгоценные металлы.

Выброс компьютеров на свалки приводит к повреждению экологии и окружающей среды. Поэтому необходимо обратиться к лицензированным компаниям, представляющим услуги по утилизации отходов.

При утилизации ЭВМ происходит разделение частей на фракции: металлы, пластмассы, стекло, провода, штекеры. Применяются следующие методы переработки компьютеров:

- сортировка печатных плат по доминирующим материалам;
- дробление и измельчение;
- гранулирование; сепарация;
- обжиг полученной массы для удаления сгорающих компонент;
- расплавление полученной массы;
- рафинирование;
- прецизионное извлечение отдельных материалов;
- создание экологических схем переработки компьютерного лома;
- создание экологически чистых компьютеров.

В Томске можно обратиться в компанию РУСУТИЛИТ, занимающуюся утилизацией ЭВМ, которая работает на основании лицензии Федеральной службы по надзору в сфере природопользования 066 № 00329 от 04 февраля 2016 г. на деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию размещению отходов I-IV классов опасности [15].

При эксплуатации объекта установлены основные виды воздействий проектируемого объекта: физическое наличие объекта (сооружение и эксплуатация объекта) влияет на гидрологию, климат, социально-экономические условия жизни, природопользование местного населения:

- Химические вещества, пыль, твердые бытовые отходы загрязняют компоненты окружающей среды (воздух, воду, водные биоресурсы, почвы,

растительность), воздействуют на биопродуктивность водоемов и здоровье населения;

- Шум, вибрация, электромагнитное излучение воздействуют на компоненты окружающей среды;
- Динамическое воздействие движущихся машин и механизмов на людей, животных, растительность, почву.

Мероприятиями по снижению интенсивности загрязнения атмосферного воздуха, создание препятствий на пути распространения и их очисткой разными методами:

Физико-химическими – для сварочных работ применение устройств для сбора и очистки газов (местных отсосов).

Биологическими – сохранение и создание полос озеленения вокруг объекта.

Воздействие на гидросферу.

Ведется систематическая работа по сокращению загрязнения сточных вод и общих объемов водопотребления и водоотведения, а так же проводится очистки загрязненных и ливневых сточных вод.

Мероприятиями по снижению негативного шумового воздействия являются сохранения природных и создание искусственных препятствий для снижения уровня шума. При складировании (утилизации) отходов промышленного производства выявляются источники образования отходов потребления и производства, мероприятия по их утилизации. К таковым источникам относятся горюче-смазочные материалы, металлолом, бытовые отходы. В качестве мероприятий по утилизации всех видов отходов предусматривается их вывоз на площадки хранения ТБО, повторная переработка ГСМ и металлолома.

5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Лаборатория по разработке и исследованию электропривода, согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» и Техническому регламенту о пожарной безопасности относится к категории «Д». Категория Д – это категория помещений в которых присутствуют негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

План эвакуации — это схематическое изображение этажа, в котором указаны выходы, эвакуационные пути, места расположения телефонов, аптек, средств индивидуальной защиты, огнетушителей и пожарных извещателей. Дополняется правилами поведения людей при эвакуации из здания, и последовательностью действий обслуживающего персонала на объекте при возникновении чрезвычайного происшествия

План эвакуации должен:

- Четко показывать пути эвакуации и выходы в безопасную зону,
- Указать, где находится пожарное оборудование и средства оповещения о пожаре (огнетушители, телефоны и т.д.),
- Напомнить о том, что необходимо делать человеку в случае обнаружения возгорания.

Планы эвакуации должны включать в себя текстовую и графическую части. В графической части должно быть изображение с планировкой здания, а так же обязательно должны быть отмечены:

- Пути эвакуации;
- Эвакуационные выходы и место размещения спасательных средств;
- Аварийный выход, незадымляемые лестничные клетки, наружные открытые лестницы и т. п.;
- Место размещения плана эвакуации в здании;
- Место размещения средств противопожарной защиты.

Изображения знаков безопасности, символов ИМО должно соответствовать ГОСТ Р 12.4.026.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме"[12], тушение пожара организуется первичными средствами, такими как: огнетушитель порошковый (ОП-5, 4 штуки), огнетушитель углекислый (ОУ-5, 4 штуки, вместительность баллона составляет 7,2 л.). В случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Этажные планы эвакуации в графической части должны содержать номер этажа.

Текстовая часть должна содержать:

- Описание способов оповещения о возникновении пожара, аварии и др.;
- Описание порядка и последовательности в которой осуществляется эвакуация людей;
- Действия и обязанности людей (например, порядок вызова пожарных);
- Описание порядка в котором осуществляется аварийная остановка оборудования, остановка механизмов, отключение электропитания и т. д.;
- Описание порядка включения систем пожарной автоматики (установок пожаротушения, систем дымоудаления, а также систем оповещения).

5.8 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с Трудовым кодексом РФ, в целях обеспечения требований охраны труда осуществляется контроль за их выполнением, в каждой организации численностью более 100 сотрудников создается служба охраны труда. Либо заключается договор со специалистами. Служба охраны труда подчиняется руководителю предприятия. На должность специалиста по охране труда назначаются имеющие квалификацию инженера по охране труда или прошедшие специальное обучение.

В нашем случае на предприятии 20 человек, поэтому, в соответствии с Трудовым кодексом, на производстве с численностью более десяти человек должны создаваться комитеты по охране труда, в состав которых входят представители работодателя и профсоюзов. Задачами комитета являются: организация по обеспечению выполнения работниками требований по охраны труда, контроль за соблюдением охраны труда, информация о состоянии охраны труда. Комитет по охране труда ведет учет и анализ производственного травматизма и профессиональных заболеваний, измерение величин опасных и вредных факторов, оценку травмобезопасности, аттестацию рабочих мест, приемку в эксплуатацию производственных объектов, согласование документации в области охраны труда, участие в расследовании несчастных случаев, обучение по охране труда в соответствии со следующими документами:

- Трудовой кодекс РФ;
- ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ;
- ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ;
- ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ;
- СНиП П-12-77;
- СанПиН 1757-77;
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был рассмотрен и рассчитан частотно–регулируемый электропривод механизма главного подъёма крана КМ20/5. На основе анализа требования, предъявляемых к электроприводу, выбран крановый электродвигатель, предназначенный для частотного регулирования, и преобразователь частоты, обеспечивающий требуемый набор функций управления. В качестве способа управления выбрано скалярное управление. В ходе работы рассчитаны и построены электромеханические и механические характеристики электропривода и нагрузки, на основании которых была проведена проверка правильности выбора двигателя и преобразователя.

Путем имитационного моделирования исследованы все основные режимы работы: пуск на минимальную и максимальную скорость без груза и с максимальным грузом, останов. Также было произведено исследование работы электропривода с ограничением тока. Оно показало, что электропривод работоспособен при перегрузках. Спроектированный электропривод полностью отвечает условиям технического задания.

Список Литературы

1. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие для вузов / И. И. Алиев. — М.: Высшая школа, 2000. — 255 с.
2. Алиев И. И. Электротехнический справочник. — М.: ИП РадиоСофт, 2000. — 384 с.
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. — М.: "Академия", 2004.
5. Дьяконов В. П. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5* : Основы применения : Полное руководство пользователя. — М. : СОЛОН-Пресс, 2002. — 768 с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 560 с.
7. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электропроводах. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.
8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. — М.: Издательский центр "Академия", 2006. — 272 с.
9. Электродвигатели асинхронные. Справочник / В.Л. Лихачев. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 304 с.
10. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. — М.: Издательский центр "Академия", 2005. — 304 с.
11. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. — Изд. 2-е, перераб. и дополн. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 156 с.
12. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория

оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.

13. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 448 с.

14. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – 476с.

15. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с

16. Л.А.Одинцова. Планирование на предприятии: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Л.А.Одинцова. 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 272 с.

17. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

18. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

19. ГОСТ 17494-87 - Машины электрические вращающиеся.

20. ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. — 6-е и 7-е изд.. — Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2009. — 687 с.: ил.. — ISBN 978-5-379-01195-6.

21. ГОСТ 12.1.000-02 ССБТ – Электробезопасность. Допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

22. ГОСТ 12.1.003-83(СТ СЭВ 1930-79) – Шум. Общие требования безопасности.

23. ГОСТ 12.4.051-87 – Средства индивидуальной защиты органа слуха.

24. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.

25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.

27. ГОСТ 12.1.012-90 – Вибрационная безопасность.

26. ГОСТ 12.4.012-83 – Вибрация. Средства измерения и контроля вибрации на рабочих местах. Технические требования..

27. НПБ 105-03 Определение категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

28. СНиП 2.01.51 – 90 Инженерно – технические мероприятия гражданской обороны.

29. Методика расчета зануления. – «Электробезопасность». Комплект лабораторных работ: учебное пособие по практическому изучению средств защиты от электропоражения в сетях до 1 кВ для студентов всех специальностей: учебное пособие. А.Г. Дашковский, Ю.В. Бородин, А.А. Сечин, М.В. Гуляев, А.Г. Кагиров – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 97.

30. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

31. ГОСТ 12.4.221-2002 Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты.