

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Регулируемый электропривод переменного тока механизма подъема крана</b>

УДК 621.873-83

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Сапунов Сергей Игоревич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	к.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Умурзакова А. Д.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова А.А.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
<b>Р 1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
<b>Р 2</b>	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
<b>Р 3</b>	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
<b>Р 4</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
<b>Р 5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<b>Р 7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
<b>Р 8</b>	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
<b>Р 11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
<b>Р 12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ А.С. Ивашутенко

(Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Сапунову Сергею Игоревичу

Тема работы:

**Регулируемый электропривод переменного тока механизма подъема крана**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 3483/с от 06.05.2019г

Срок сдачи студентом выполненной работы:

31.05.2019г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Кран мостовой опорный грузоподъемностью 10 т., режим работы – циклический.

Требования к механизму подъема: диапазон регулирования  $D=1:100$ , при плавном регулировании скорости в момент пуска и торможения.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор и современное состояние электрооборудования мостовых кранов, постановка задачи; выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема; выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма передвижения; исследование работы мостового крана с помощью имитационной модели.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Структурная схема электропривода подъема мостового крана Графики переходных процессов подъема</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p>Мелик-Гайказян Мария Вигеновна</p>
<p>«Социальная ответственность»</p>	<p>Сотникова Анна Александровна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Заключение</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>05.04.2019г.</p>
--	---------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	к.т.н.		05.04.2019г.
Старший преподаватель	Умурзакова А. Д.	к.т.н.		05.04.2019г

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Сапунов Сергей Игоревич		05.04.2019г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)  
 Отделение Электроэнергетики и электротехники  
 Профиль Электропривод и автоматика  
 Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

**Бакалаврская работа**

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.05.2019	Основная часть	60
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов И.Г.	к.т.н.		

**Консультант**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Умурзакова А. Д.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 98 с., 17 рис., 14 табл., 19 источников, 1 прил.

Ключевые слова: мостовой кран, асинхронный двигатель, имитационная модель, частотно-регулируемый электропривод.

Объектом исследования является кран мостовой двухбалочный опорный г/п 10 тонн

Цель работы – исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема мостового крана.

В процессе исследования проводились эксперименты в среде Matlab Simulink по исследованию электропривода мостового крана

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010). Также при работе использовались программы Matlab Simulink, Microsoft Visio 2010 и MathCAD.

## Содержание

Введение.....	9
1 Обзор и современное состояние электрооборудования мостовых кранов, постановка задачи .....	10
1.1 Краткая техническая характеристика мостового крана .....	10
1.2 Кинематические схемы механизмов мостового крана.....	12
1.3 Условия работы и требования, предъявляемые к электроприводу мостового крана	14
1.4 Современные крановые электроприводы, обоснование и выбор .....	15
1.5 Противораскачивание груза.....	19
1.6 Исходные данные и постановка задачи .....	21
2 Выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема .....	23
2.1 Выбор электродвигателя и определение параметров схемы замещения .....	23
2.2 Расчет редуктора и тормозного устройства .....	28
2.3 Расчет статических характеристик электродвигателя.....	30
2.4 Выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы двигателя .....	34
2.5 Расчет характеристик двигателя при векторном управлении и проверка выбора двигателя и преобразователя .....	35
2.6 Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с векторным управлением.....	40
2.7 Имитационная модель электрической части силового канала.....	41
2.8 Методика настройки контуров регулирования САУ асинхронного электропривода.....	46
2.8.1 Контур тока с ПИ-регулятором и датчиком тока .....	47
2.8.2 Контур скорости с ПИ-регулятором и датчиком скорости .....	49
2.8.3 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и датчиком потока ..	52
2.9 Исследования имитационной модели электропривода подъема мостового крана с учетом крановой нагрузки .....	54

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» .....	58
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	59
3.1 SWOT-Анализ работы регулируемого электропривода переменного тока механизма подъёма крана.....	59
3.2. Планирование технического проекта.....	63
3.2.1. Определение структуры работ в рамках технического проектирования ..	63
3.2.2 Структура работ в рамках технического проектирования.....	64
3.2.3 Определение трудоемкости выполнения работ .....	65
3.3 Составление сметы технического проекта .....	67
3.3.1 Полная заработная плата исполнителей ВКР .....	68
3.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	69
3.3.3 Накладные расходы.....	70
3.3.4 Формирование сметы технического проекта .....	70
3.4. Определение ресурсоэффективности проекта .....	71
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ».....	74
4. Социальная ответственность .....	76
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	77
4.2 Производственная безопасность .....	79
4.2.1. Анализ вредных факторов, связанных с эксплуатацией крана .....	79
4.2.2 Анализ опасных факторов, связанных с эксплуатацией крана.....	83
4.2.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов .....	84
4.3. Экологическая безопасность.....	87
4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	88
Заключение .....	91
Conclusion.....	92
Список использованных источников .....	93
Приложение А .....	95

## **Введение**

Из всего многообразия общепромышленных механизмов, работающих на металлургических предприятиях, можно выделить группу, для которой особенно остро стоит проблема чрезмерно высокого уровня динамических нагрузок. В такую группу оборудования промышленных предприятий в первую очередь входят подъемно-транспортные механизмы: мостовые и козловые краны, крановые перегружатели, транспортеры, конвейеры, питатели и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают мостовые краны. Многочисленными исследованиями установлено, что упругие механические колебания в подавляющем большинстве случаев отрицательно влияют на работу электропривода, вызывая повышение динамических нагрузок, снижение точности работы механизма, появление механических вибраций и опасных резонансных явлений. Возникающий при этом чрезмерно высокий уровень динамических нагрузок, особенно при пусках, реверсах и торможениях ведет к преждевременному выходу из строя элементов механизмов кранов и подкрановых конструкций.

При исследованиях, посвященных проблеме снижения динамических нагрузок было установлено, что самым эффективным способом снижения динамических нагрузок, а, следовательно, повышения долговечности механизмов передвижения кранов и подкрановых конструкций является модернизация существующих схем электроприводов и внедрение новых, которые обеспечивают снижение разницы в скоростях передвижения опор крана.

В связи с тем, что главную роль в создании условий высокой производительности подъемно-транспортного оборудования отводится электроприводу, то с учетом сложной специфики работы такого оборудования необходимо отдавать предпочтение простым и высоконадежным системам электроприводов.

# **1 Обзор и современное состояние электрооборудования мостовых кранов, постановка задачи**

## **1.1 Краткая техническая характеристика мостового крана**

Кранами называются грузоподъемные устройства, циклического действия, служащие для вертикального и горизонтального перемещения грузов на большие расстояния. По особенностям конструкций, связанным с назначением и условиями работы, краны разделяются на мостовые, порталные, козловые, башенные и др. В цехах предприятий электромашиностроения наибольшее распространение получили мостовые краны, с помощью которых производится подъем и опускание тяжелых заготовок, деталей и узлов машин, а также их перемещение вдоль и поперек цеха. Вид мостового крана в основном определяется спецификой цеха и его технологией, однако многие узлы кранового оборудования, например механизмы подъема и передвижения, выполняются однотипными для различных разновидностей кранов.

На электрических кранах устанавливают электродвигатели, пусковые и регулировочные сопротивления, тормозные электромагниты, контроллеры, защитную, пускорегулирующую, сигнальную, блокировочную и осветительную аппаратуру, конечные выключатели, токосъемники. Питание на кран подается или через троллейные проводники, неподвижно закрепленные на строительных конструкциях, и токосъемники, закрепленные на кране, или при помощи гибкого шлангового кабеля. Электродвигатели, аппараты и электропроводку кранов монтируют в исполнении, соответствующем условиям окружающей среды [1].

В зависимости от вида транспортируемых грузов на мостовых кранах используют различные грузозахватывающие устройства: крюки, магниты, рейферы, клещи и т.п. В связи с этим различают краны крюковые, магнитные, рейферные, клещевые и т.п. Наибольшее распространение получили краны с крюковой подвеской или с подъемным электромагнитом, служащим для транспортировки стальных листов, стружки и других ферромагнитных материалов.

Мостовые краны в зависимости от назначения и характера выполняемой работы снабжают различными грузозахватными приспособлениями: крюками, грейферами, специальными захватами и т.п. Мостовой кран весьма удобен для использования, так как благодаря перемещению по крановым путям, расположенных в верхней части цеха, он не занимает полезной площади.

Электропривод большинства грузоподъемных машин характеризуется повторно - кратковременном режимом работы при большей частоте включения, широком диапазоне регулирования скорости и постоянно возникающих значительных перегрузках при разгоне и торможении механизмов. Особые условия использования электропривода в грузоподъемных машинах явились основой для создания специальных серий электрических двигателей и аппаратов кранового исполнения. В настоящее время крановое электрооборудование имеет в своём составе серии крановых электродвигателей переменного и постоянного тока, серии силовых и магнитных контроллеров, командоконтроллеров, кнопочных постов, конечных выключателей, тормозных электромагнитов и электрогидравлических толкателей, пускотормозных резисторов и ряд других аппаратов, комплектующих разные крановые электроприводы.

В настоящее время грузоподъемные машины выпускаются большим числом заводов. Эти машины используются во многих отраслях народного хозяйства в металлургии, строительстве, при добыче полезных ископаемых, машиностроении, транспорте, и в других отраслях.

Развитие машиностроения, занимающиеся производством грузоподъемных машин, является важным направлением развития народного хозяйства страны.

Мостовые краны состоят из несущих элементов, непосредственно опирающихся на крановый путь, и моста, перемещающегося по уложенным на стенах или внешних эстакадах рельсам (рисунок 1). Пути укладываются на подкрановые балки, опирающиеся на выступы верхней части колонны цеха. Механизм передвижения крана установлен на мосту крана. Управление всеми механизмами происходит из кабины, прикрепленной к мосту крана. Питание

электродвигателей осуществляется по цеховым троллеям. Для подвода электроэнергии применяют токосъемы скользящего типа, прикрепленные к металлоконструкции крана. В современных конструкциях мостовых кранов токопровод осуществляется с помощью гибкого кабеля. Привод ходовых колес осуществляется от электродвигателя через редуктор и трансмиссионный вал.

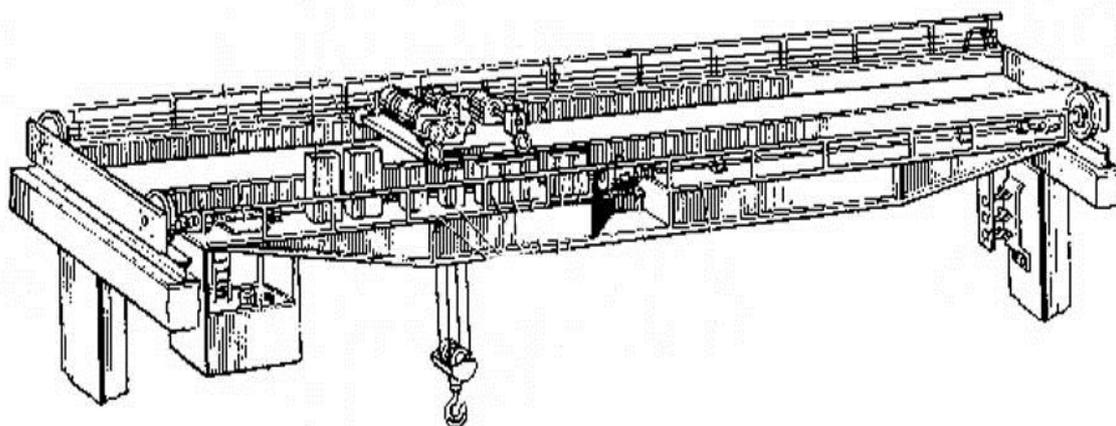


Рисунок 1 – Общий вид мостового крана

Любой современный грузоподъемный кран в соответствии с требованиями безопасности, может иметь для каждого рабочего движения в трех плоскостях, следующие самостоятельные механизмы: механизм подъема - опускания груза, механизм передвижения крана в горизонтальной плоскости и механизмы обслуживания зоны работы крана (передвижения тележки).

Грузоподъемные машины изготавливают для различных условий использования: по степени загрузки, времени работы, интенсивности ведения операций, степени ответственности грузоподъемных операций и климатических факторов эксплуатации.

## **1.2 Кинематические схемы механизмов мостового крана**

Работу основных механизмов крана рассматривают по кинематическим схемам. Так как двигатели обычно имеют угловую скорость, значительно большую, чем скорость подъемного барабана или ходовых колес моста или тележки, то движение к рабочим органам механизмов крана передается через редукторы.

Для механизмов подъема наибольшее применение получили схемы с полиспастом П (рисунок 2), при помощи которого движение от барабана Б передается крюку [2].

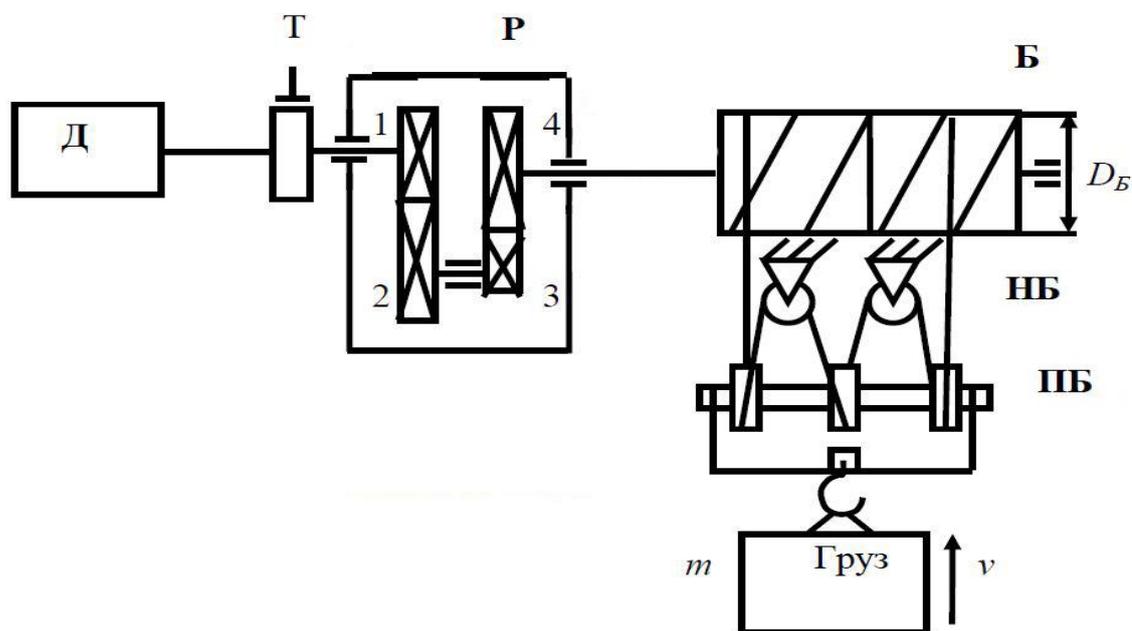


Рисунок 2 – Кинематическая схема механизма подъема

Двигатель Д через редуктор Р приводит во вращение барабан лебедки, на который канат наматывается при подъеме и сматывается при опускании груза  $m$ . Грузозахватное приспособление подвешивается на подвижных блоках ПБ, которые образуют с неподвижными относительно лебедки блоками НБ полиспаст.

Двигатель включается в работу после строповки груза, затем выбирается слабина каната. Далее выполняется разгон с ускорением не выше допустимого до рабочей скорости и обеспечивается подъем груза. При достижении заданной высоты двигатель тормозится, на вал двигателя накладывается тормоз Т. Удержание груза в подвешенном состоянии осуществляется тормозом.

При спуске груза выдерживается ускорение не выше допустимого, двигатель работает в тормозном режиме. При подходе груза к площадке выгрузки скорость спуска снижается, груз плавно устанавливается на площадку. Ослабляется натяжение канатов для расстроповки груза, крюк отцепляется и цикл работы повторяется.

### **1.3 Условия работы и требования, предъявляемые к электроприводу мостового крана**

Повышенная опасность работ при транспортировке поднятых грузов требует при проектировании и эксплуатации соблюдение обязательных правил по устройству и эксплуатации подъемно-транспортных машин. На механизмах подъема и передвижения правилами по устройству и эксплуатации предусмотрена установка ограничителей хода, которые воздействуют на электрическую схему управления. Конечные выключатели механизма подъема ограничивают ход грузозахватывающего приспособления вверх, а выключатели механизмов передвижения моста и тележки ограничивают ход механизмов в обе стороны. Предусматривается также установка конечных выключателей, предотвращающих наезд механизмов в случае работы двух и более кранов на одном мосту. Исключение составляют установки со скоростью движения до 30 м/мин. Крановые механизмы должны быть снабжены тормозами закрытого типа, действующими при снятии напряжения [4].

На крановых установках допускается применять рабочее напряжение до 500 В, поэтому крановые механизмы снабжают электрооборудованием на напряжения 220, 380, 500 В переменного тока и 220, 440 В постоянного тока. В схеме управления предусматривают максимальную защиту, отключающую двигатель при перегрузке и коротком замыкании. Нулевая защита исключает самозапуск двигателей при подаче напряжения после перерыва в электроснабжении. Для безопасного обслуживания электрооборудования, находящегося на ферме моста, устанавливаются, блокировочные контакты на люке и двери кабины. При открывании люка или двери напряжение с электрооборудования снимается [5], [6].

Для качественного выполнения подъема, спуска и перемещения грузов электропривод крановых механизмов должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- регулирование угловой скорости двигателя в сравнительно широких пределах в связи с тем, что тяжелые грузы целесообразно перемещать с меньшей

скоростью, а пустой крюк или ненагруженную тележку – с большей скоростью для увеличения производительности крана. Пониженные скорости необходимы также для осуществления точной остановки транспортируемых грузов с целью ограничения ударов при их посадке и облегчают работу оператора. Обеспечение необходимой жесткости механических характеристик привода, с тем чтобы низкие скорости почти не зависели от груза;

- ограничение ускорений до допустимых пределов при минимальной длительности переходных процессов. Первое условие связано с ослаблением ударов в механических передачах при выборе зазора, с предотвращением пробуксовки ходовых колес тележек и мостов, с уменьшением раскачивания подвешенного на канатах груза при интенсивном разгоне и резком торможении механизмов передвижения; второе условие необходимо для обеспечения высокой производительности крана;

- реверсирование электропривода и обеспечение его работы, как в двигательном режиме, так и в тормозном режиме.

-

#### **1.4 Современные крановые электроприводы, обоснование и выбор**

Основное назначение электропривода крана - регулирование скорости механизмов подъема и передвижения в некотором диапазоне. В первую очередь, тип электропривода зависит от физических принципов регулирования скорости конкретных видов двигателей.

На практике чаще всего применяются следующие двигатели:

- электродвигатели постоянного тока;
- асинхронные электродвигатели с фазным ротором;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

В таблице 1 приведены достоинства и недостатки электродвигателей, используемых на кранах.

Таблица 1 – Сравнение двигателей, используемых на кранах

	Достоинства	Недостатки
Двигатели постоянного тока	<ul style="list-style-type: none"> <li>– простота устройства и принципов управления;</li> <li>– практически линейные механические и регулировочные характеристики;</li> <li>– большой пусковой момент.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– дороговизна изготовления;</li> <li>– износ и необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щёточных узлов;</li> <li>– необходимо дополнительно устанавливать в цеху выпрямители трехфазного напряжения.</li> </ul>

Продолжение таблицы 1

	Достоинства	Недостатки
Асинхронные электродвигатели с фазным ротором	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большой начальный вращающий момент;</li> <li>– приблизительно постоянная скоростью при различных перегрузках;</li> <li>– меньший пусковой ток по сравнению с электродвигателями с короткозамкнутым ротором</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большие габариты;</li> <li>– дороговизна изготовления;</li> <li>– износ и необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щёточных узлов.</li> </ul>
Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором	<ul style="list-style-type: none"> <li>– относительная дешевизна;</li> <li>– отсутствие коллекторно-щёточных узлов;</li> <li>– легкость конструкции и простота ее изготовления;</li> <li>– высокий КПД и <math>\cos \varphi</math> по сравнению с двигателями с фазным ротором.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большой пусковой ток (до 5-7 <math>I_n</math>);</li> <li>– сложное техническое оборудовании для регулирования скорости вращения.</li> </ul>

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение на тяжелых металлургических производствах, в т.ч. на литейных кранах. В настоящее время, новые краны с двигателями постоянного тока практически не изготавливаются.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором получили наибольшее распространение на кранах в советское время и популярны в наши дни.

Двигатели данного типа применяются как для реконструкции, так и для новых грузоподъемных кранов.

Существует множество разновидностей систем управления для двигателей с фазным ротором. Изменение скорости и момента таких двигателей достигается путем включения в цепь ротора дополнительных электрических устройств. В зависимости от требований к диапазону регулирования скорости могут применяться:

- реостатные системы;
- дроссельные системы без регулирования скорости;
- дроссельные системы с тиристорными регуляторами.

В качестве коммутационного оборудования в цепях статора и ротора могут применяться:

- силовые контакторы, пускатели, реверсоры (и другие механические устройства коммутации);
- тиристоры (тиристорные ключи);
- IGBT-транзисторы;
- гибридные системы.

На сегодняшний день такая система управления морально устарела и на фоне современных микропроцессорных систем управления мостовыми кранами зарубежных производителей с частотным регулированием отличается повышенным энергопотреблением. Явным недостатком такой системы является такое явление, как «избыточный динамический момент», который возникает в момент пуска электродвигателя. Это явление порождает ударные нагрузки, приводит к преждевременному износу элементов, появлению люфтов в трансмиссии приводов, снижению точности позиционирования, повышенной утомляемости операторов и, как следствие, ухудшение качества выполняемых грузоподъемным механизмом работ.

Текущие и капитальные ремонты дадут эффект только на несколько месяцев, а дальше снова «разбитые» элементы трансмиссии. Это явление обусловлено спецификой подбора первой ступени резисторов. В релейно-

контакторных системах управления со ступенчатым регулированием скорости «избыточного динамического момента» никак не избежать – это технологическая особенность такого привода, она заключается в том, что первая пусковая ступень резисторов подбирается таким образом, чтобы пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором был равен критическому моменту для устойчивости от «опрокидывания». То есть при пуске двигатель практически мгновенно развивает максимально-возможный момент, что порождает ударные нагрузки, именуемые «динамическим моментом». При проектировании и изготовлении грузоподъемного оборудования мощность электродвигателей в 2-3 раза превышала фактические требования механизма.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором мало применялись на кранах в советское время в силу технологической сложности регулирования скорости. Использование ограничивалось легкими тельферными подъемниками, кран-балками и прочими одно-, двухскоростными тихоходными механизмами. В остальных случаях заменить двигатели постоянного тока либо двигатели с фазным ротором в то время они не могли. Ситуация изменилась лишь с широким распространением и удешевлением преобразователей частоты.

Снижение цен на полупроводниковые приборы в конце 90-ых годов подтолкнуло краностроителей к переходу к современным системам управления. Начиная с 2000 года в СНГ на новых кранах стали всё чаще применяться системы на базе преобразователей частоты. Преобразователи частоты позволяют плавно изменять величину напряжения и частоту на клеммах двигателя, благодаря чему становится возможным управлять скоростью вращения двигателя, сохраняя номинальный момент во всем диапазоне регулирования.

Использование асинхронного двигателя на базе преобразователя частоты обеспечит:

– абсолютный контроль и безударное регулирование скорости, ускорения и момента при любой массе груза (в пределах допустимой);

– плавный разгон и торможение всех механизмов крана с заданным ускорением, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана;

– регулирование скорости АД с помощью преобразователей частоты дает экономию электроэнергии до 20 %, электроприводы работают с  $\cos\phi$  близким к 1;

– программируемый логический контроллер, использованный в системе кранового электропривода, и имеющий связь по сети с ПЧ, позволяет решить задачи диагностики, статистического сбора и обработки всех сигналов и нагрузок;

– тормозные колодки не требуют частой замены, а тормоза – постоянной регулировки, поскольку управляемое торможение осуществляют ПЧ, а тормоза служат лишь для удержания после полной остановки механизма;

– ограничение моментов как статических, так и динамических;

– устранение перекосов и раскачивания грузов;

– защита электродвигателей (максимально-токовая, время-токовая, тепловая и др.);

– улучшение условий работы оператора крана за счет применения современной аппаратуры управления;

– сокращение количества релейно-контакторной аппаратуры позволяет повысить надежность работы электрооборудования и уменьшить трудозатраты на профилактическое обслуживание;

– уменьшение динамических нагрузок на механизмы крана и увеличение сроков службы оборудования.

### **1.5 Противораскачивание груза**

Каждое движение крана с подвешенным грузом приводит к его колебаниям, поэтому оператор крана должен постоянно корректировать свои действия с учетом этого раскачивания. Опытный и внимательный оператор может достаточно быстро уменьшить колебания груза путем принятия соответствующих контрмер. Если же оператор не обладает большим опытом

управления краном или оператор потерял внимание по причине утомления, то даже самые простые операции могут привести к огромной потере времени или к возникновению рисков коллизий и/или аварийных ситуаций.

Системы уменьшения колебаний груза (системы противораскачивания), снимают с оператора задачи по уменьшению раскачивания груза, как следствие он может сосредоточиться на управлении краном, сконцентрироваться на подъеме груза, его перемещении, позиционировании и опускании в нужную точку.

Системы противораскачивания служат для уменьшения колебаний груза, вызванных ускорениями механизмов в процессе эксплуатации крана. Успокоение достигается за счет точного воздействия на процессы разгона и торможения. Такие системы могут применяться как в составе систем управления для новых кранов, так и в качестве дополнения к уже существующим системам управления. Уменьшение колебаний позволяет снизить риск возникновения коллизий и аварийных ситуаций в сочетании с одновременной быстротой и точностью позиционирования груза. Система противораскачивания позволяет уменьшить колебания при перемещении моста, тележки и поворота крана одновременно.

Существует два основных вида электронных систем противораскачивания: системы с прямой обратной связью, имеющие в своем составе камеру и рефлектор (отражатель), которые обеспечивают получение оперативной достоверной информации об отклонении груза, и системы, работающие на основе математической модели, описывающей колебания груза при движении механизмов крана, то есть угол отклонения груза в той или иной плоскости вычисляется исходя из физических и математических законов [7].

В системах с обратной связью камера с высоким разрешением используется для измерения отклонения крюка или другого типа грузозахватного органа от своей оси. Для того, что бы сделать это возможным, на грузозахватный механизм устанавливается специальный отражатель. В самом простом случае отражатель представляет собой плоскость квадратной формы с

расположенными на ней в шахматном порядке двумя белыми квадратами. Данный тип рефлектора называется пассивным. В случае, когда на него могут воздействовать чрезмерное освещение или тени, которые влияют на точность системы измерения, рекомендуется использовать активный рефлектор, снабженный LED-матрицей, а также обогревом, способствующим таянию снега, если кран используется на открытом воздухе. Самым лучшим же выходом в случае использования системы «камера-рефлектор» является применения инфракрасного рефлектора и оснащение камеры инфракрасным фильтром. Точность определения колебаний составляет 5 мм на расстоянии от камеры до рефлектора 10м, точность определения расстояния между камерой и рефлектором составляет 1%. Такие системы способны также исключать колебания груза при наличии сильного бокового ветра.

Какой бы вид системы противораскачивания груза ни был установлен на кране, ее применение ведет к снижению времени выполнения операций, повышению точности позиционирования груза, уменьшению утомляемости операторов во время работы, а также снижает риск возникновения аварийных ситуаций.

## **1.6 Исходные данные и постановка задачи**

Исходными данными проектирования являются физические и геометрические параметры механизма подъема мостового крана. Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Исходные данные проектирования

Наименование параметра	Значение параметра
Тип крана	кран мостовой опорный
Конструкция кранового моста	двухбалочный мост, балки коробчатые
Грузоподъемность крана, т	10
Кратность полиспаста, $\alpha$	3
Номинальная скорость подъема, м/с	0,1
Номинальная скорость движения тележки, м/с	0,63
Диаметр барабана лебедки, м	$90 \cdot 10^{-3}$
Напряжение в канате, тс/см <sup>2</sup>	2
Модуль упругости каната, тс/см <sup>2</sup>	1500

Продолжение таблицы 2

Наименование параметра	Значение параметра
Продолжительность включения крана, %	25
Высота пролетной балки, м	2,5

## 2 Выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема

### 2.1 Выбор электродвигателя и определение параметров схемы замещения

Расчет предварительной мощности двигателя производится по формуле:

$$P \geq \frac{P_c}{k_T}, \quad (2.1)$$

где  $P$  – мощность двигателя, Вт;

$P_c$  - статическая мощность электродвигателя, Вт ;

$k_T = 1$  – коэффициент, учитывающий режим работы механизма, вид управляющего устройства и электропривода [8].

Статическая мощность электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$P_c = \frac{F_{\Gamma} \cdot V}{\eta_M}, \quad (2.2)$$

где  $F_{\Gamma}$  - грузоподъемная сила, Н;

$\eta_M = 0,9$  — значение КПД механизма подъема.

Грузоподъемная сила рассчитывается по формуле:

$$F_{\Gamma} = m_{\Gamma} \cdot g, \quad (2.3)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,

$m_{\Gamma}$  - номинальная масса груза, кг.

$$F_{\Gamma} = 10000 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Статическая мощность электродвигателя

$$P_c = \frac{9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{0,9} = 10,9 \text{ кВт}$$

$$P \geq \frac{10,9 \cdot 10^3}{1} = 10,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Из справочника [9] выбираем с учетом ПВ = 25% и мощности  $P > 10,9$  кВт электродвигатель серии 5А. Технические данные электродвигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры электродвигателя

Типо- размер	$P_{ДВ.Н},$ <i>кВт</i>	$n_{ном},$ <i>об/мин</i>	$\eta, \%$	$\cos \varphi_H$	$M_n /$ $M_{НОМ}$	$I_n /$ $I_{НОМ}$	$s_H, \%$	$J_{ДВ}, кг \cdot м^2$
5А160S6	11	970	87	0,82	1,9	6,5	3	0,11

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1H}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.} \quad (2.4)$$

Угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_{дв.н} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,03) \cdot 104,7 = 101,5 \text{ рад/с.} \quad (2.5)$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{дв.н} = \frac{P_{дв.н} \cdot 10^3}{\omega_{дв.н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{101,5} = 108,3 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.6)$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток (действующие значения) статора при схеме соединения обмоток звезда:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \text{ В;} \quad (2.7)$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = I_{двн} = \frac{P_{двн}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \phi_H \cdot \eta_H} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,87} = 23,36 \text{ А.} \quad (2.8)$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{макс}} = k_{идв} \cdot I_{1лн} = 6,5 \cdot 23,36 = 151,84 \text{ А.} \quad (2.9)$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_k = m_k \cdot M_{дв.н} = 2,5 \cdot 108,3 = 270,7 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.10)$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{дв.пуск} = m_{п} \cdot M_{дв.н} = 1,9 \cdot 108,3 = 205,7 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.11)$$

Ток холостого хода двигателя [10]:

$$I_0 = I_{1H} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{1p^*}}{I_{1H}}\right)^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_H)}{(1 - p^* \cdot s_H)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_H)}{(1 - p^* \cdot s_H)}\right]^2}}, \text{ A} \quad (2.12)$$

где

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_{\text{двн}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot (\cos \phi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})} = \frac{0,75 \cdot 11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot (0,77 \cdot 0,87)} = 18,66 \text{ A} \quad - \quad \text{ток фазы}$$

статора при частичной нагрузке;

$p^* = 0,75$  – степень загрузки;

$\eta_{p^*} = \eta_n = 0,87$  – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \phi_{p^*} = 0,77$  – коэффициент мощности в режиме частичной загрузки.

$$I_0 = 23,362 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{18,66}{23,362}\right)^2 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}} = 10,139 \text{ A.}$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)}, \text{ Ом} \quad (2.13)$$

где  $C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{фн}}} = 1 + \frac{10,139}{2 \cdot 6,5 \cdot 23,3} = 1,033$  – коэффициент,

характеризующий соотношением  $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$ ;

$$R_2' = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,03)}{2 \cdot 2,5 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 1,033^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,03}\right)} = 0,328 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

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

$$= 0,03 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,159 \quad (2.14)$$

где  $\beta = 1$  – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора.

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме:

$$R_1 = R_2' \cdot \beta \cdot C_1 = 0,328 \cdot 1 \cdot 1,033 = 0,339 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме

$$X_{кн} = R_2' \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,328 \cdot 6,225 \cdot 1,033 = 2,112 \text{ Ом}, \quad (2.16)$$

где  $\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,03}\right)^2 - 1^2} = 6,225$  – коэффициент,

характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведенного активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 2,112 = 0,887 \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0,887}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,823 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме:

$$X_{2\sigma}' = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{2,112}{1,033} = 1,185 \text{ Ом}. \quad (2.19)$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,185}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,773 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.20)$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi H} \cdot \cos \phi_H - I_{1\phi H} \cdot R_1)^2 + (U_{1\phi H} \cdot \sin \phi_H - I_{1\phi H} \cdot X_{1\sigma})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 23,36 \cdot 0,339)^2 + (220 \cdot 0,572 - 23,36 \cdot 0,887)^2} = 202,026 \text{ В} \quad (2.21)$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202,026}{10,139} = 19,92 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{19,925}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,063 \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом	$L_{1\sigma}$ , мГн	$X_\mu$ , мГн	$L_\mu$ , Гн	$R'_2$ , Ом	$X'_{2\sigma}$ , Ом	$L'_{2\sigma}$ , мГн	$X_{KH}$ , Ом
0,339	0,887	2,823	19,925	0,063	0,328	1,185	3,773	2,112

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя [11]:

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[ X_{KH}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} = 114,975 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.25)$$

где

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 10,139 \cdot 0,063 = 0,909 \text{ Вб.} \quad (2.26)$$

Условия выполняются:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}}$$
$$108,3 < 115,146 \leq 1,1 \cdot 114,975 = 119,12;$$
$$M_{\text{эм.н}}^{**} = 114,975 \approx M_{\text{эм.н}}^* = 115,146.$$

Следовательно, предварительно принятые значения  $(\cos\varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})$  и  $\beta$  выбраны верно.

## 2.2 Расчет редуктора и тормозного устройства

Угловая скорость барабана вычисляется по формуле [12]:

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot V \cdot \alpha}{D_{\delta}}, \text{ рад} / \text{с} \quad (2.27)$$

где  $\alpha=3$  – кратность полиспаста;

$D_{\delta} = 90 \cdot 10^{-3}$  м – диаметр барабана.

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 3}{90 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \text{ рад} / \text{с}$$

Передаточное число вычисляется по формуле:

$$i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\delta}}, \quad (2.28)$$

Следовательно:

$$i = \frac{101,526}{6,6} = 15,3$$

Выбираем редуктор с передаточным отношением  $i=16$ .

Статический момент на входном валу редуктора при торможении определяется по формуле:

$$M_{\text{ст}} = \frac{M_{\Gamma} \cdot \eta_m \cdot \eta_a}{i} \quad (2.29)$$

где  $M_{\text{ст}}$  – статический момент на входном валу редуктора при торможении, Н·м;

$M_{\Gamma}$  – грузовой момент на барабане, Н·м;

$\eta_m = 0,9$  – КПД механизма, принимаем равным КПД редуктора;

$\eta_a$  – КПД полиспаста;

$i$  – номинальное передаточное число редуктора.

Определяем КПД полиспаста по следующей формуле:

$$\eta_a = \left( \frac{1 + \eta_1 + \eta_1^2 + \dots + \eta_1^{a-1}}{a} \right) \cdot \eta_1^k, \quad (2.30)$$

где  $\eta_1 = 0,98$  — КПД блока на подшипниках качения;

$k$  — число обводных блоков (для мостового крана  $k=0$ ).

КПД полиспаста:

$$\eta_a = \frac{1 + 0,98 + 0,98^2}{3} = 0,98;$$

Наибольшее натяжение ветви каната, набегающего на барабан при подъёме груза, вычисляется по формуле:

$$F_a = \frac{F_r}{\alpha \cdot \mu \cdot \eta_a}, \quad (2.31)$$

где  $F_a$  – натяжение ветви каната, Н·м

$\mu$  - число полиспастов. Для мостового крана  $\mu=2$  т.е. оба конца каната закреплены на барабане для строго вертикального подъёма груза и выравнивания усилий на опоры барабана [2] (рисунок 3).

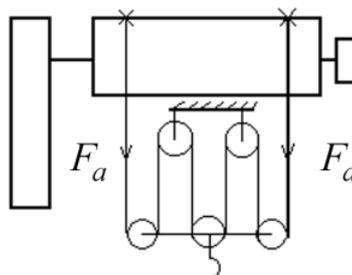


Рисунок 3 – Схема полиспаста механизма подъёма груза:  $\mu = 2$ ,  $\alpha = 3$

$$F_a = \frac{9,81 \cdot 10^4}{3 \cdot 2 \cdot 0,98} = 16,68 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Грузовой момент на барабане вычисляется по формуле:

$$M_r = \frac{\mu \cdot F_a \cdot D_b}{2}, \quad (2.32)$$

Получим:

$$M_G = \frac{2 \cdot 1,98 \cdot 10^4 \cdot 90 \cdot 10^{-3}}{2} = 1782 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Статический момент на входном валу редуктора:

$$M_{ст} = \frac{1782 \cdot 0,9 \cdot 0,98}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тормозной момент, на который регулируют тормоз, рассчитывается по формуле:

$$M_{тр} \geq k \cdot M_{сп}, \quad (2.33)$$

где  $M_{тр}$  – тормозной момент, Н·м;

$k$  — коэффициент запаса торможения.

Согласно [2]  $k > 1,5$ . Принимаем  $k = 2$ .

$$M_{тр} = 2 \cdot 98 = 196 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

### 2.3 Расчет статических характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика  $M_{эм}(s)$  электродвигателя для частоты  $f_{1H} = 50$  Гц рассчитывается по выражению [11]:

$$M_{эм}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{кн}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}, \quad (2.34)$$

где  $M_{эм}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Механическая характеристика  $\omega(M_{эм})$  показана на рисунке 4.

Значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении  $s_H$ :

$$M_{эм}(s_H) = M_{эм.H} = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[ X_{кн}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

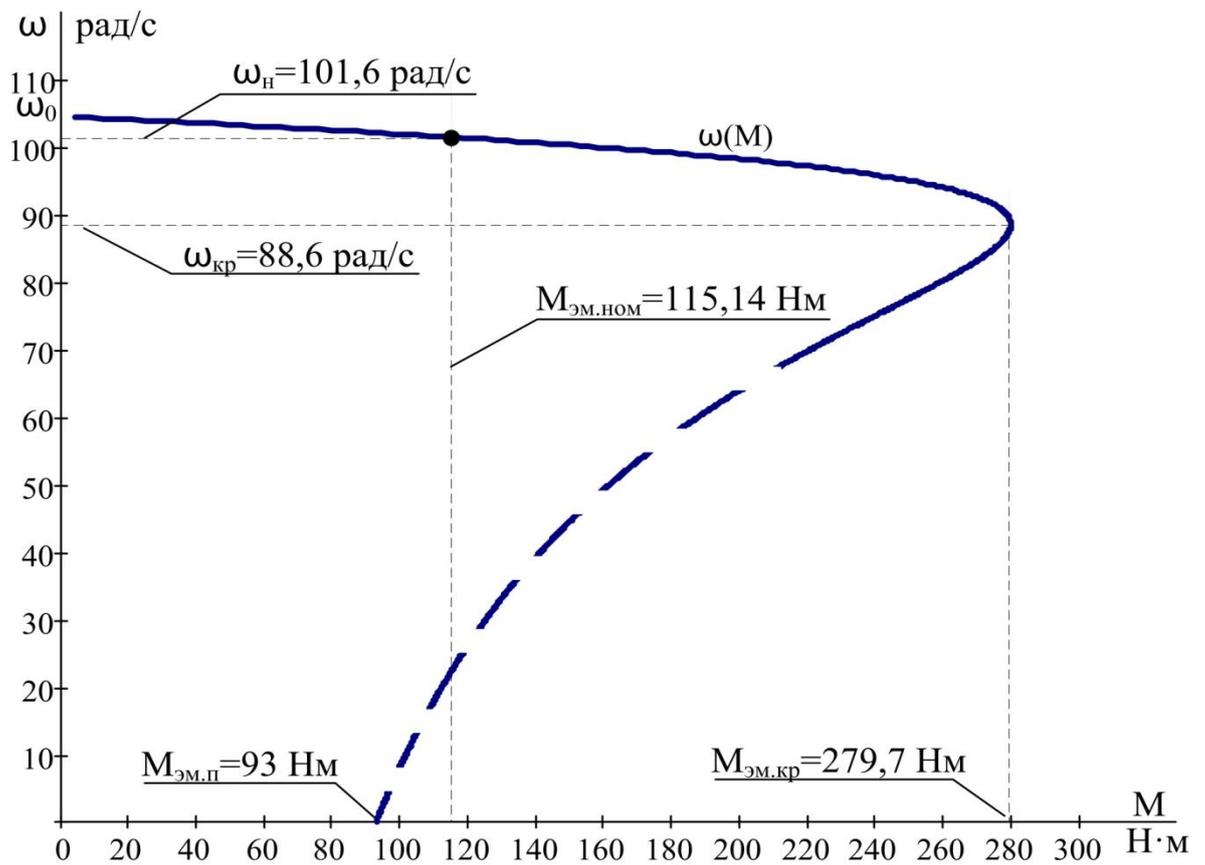


Рисунок 4 – Механическая характеристика асинхронного двигателя  $\omega(M)$

Момент трения на валу двигателя:

$$M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 115,146 - 108,23 = 6,8 \text{ Нм.} \quad (2.35)$$

Критическое скольжение:

$$s_k = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2}{R_1^2 + X_{кн}^2}} = 0,328 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,339}{19,925}\right)^2}{0,339^2 + 2,112^2}} = 0,153 ; \quad (2.36)$$

Электромагнитный критический момент при критическом скольжении:

$$M_{эм}(s_k) = M_{эм.к} = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \cdot \left[ 1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2 \right]} \right\}} = 279,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Естественные электромеханические характеристики  $I_1(s)$  и  $I_2'(s)$  электродвигателя рассчитывается для частоты  $f_{1н} = 50$  Гц по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} , \quad (2.37)$$

где  $I_1 = I_{1\phi}$  – действующее значение фазного тока двигателя, А;

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

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + 2,112^2 + \left(\frac{0,339 \cdot 0,328}{s \cdot 19,925}\right)^2}};$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,339^2 + (0,887 + 19,925)^2}} = 10,56 \text{ А},$$

– действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{кн})^2}} = \frac{2,112}{\sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + (2,112)^2}}.$$

По результатам расчета построены электромеханические характеристики двигателя  $\omega(I_1)$  и  $\omega(I_2')$  (рисунок 5), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.38)$$

Для скольжения  $s = s_H$  рассчитывается значения номинального тока статора  $I_{1H}(s_H)$ .

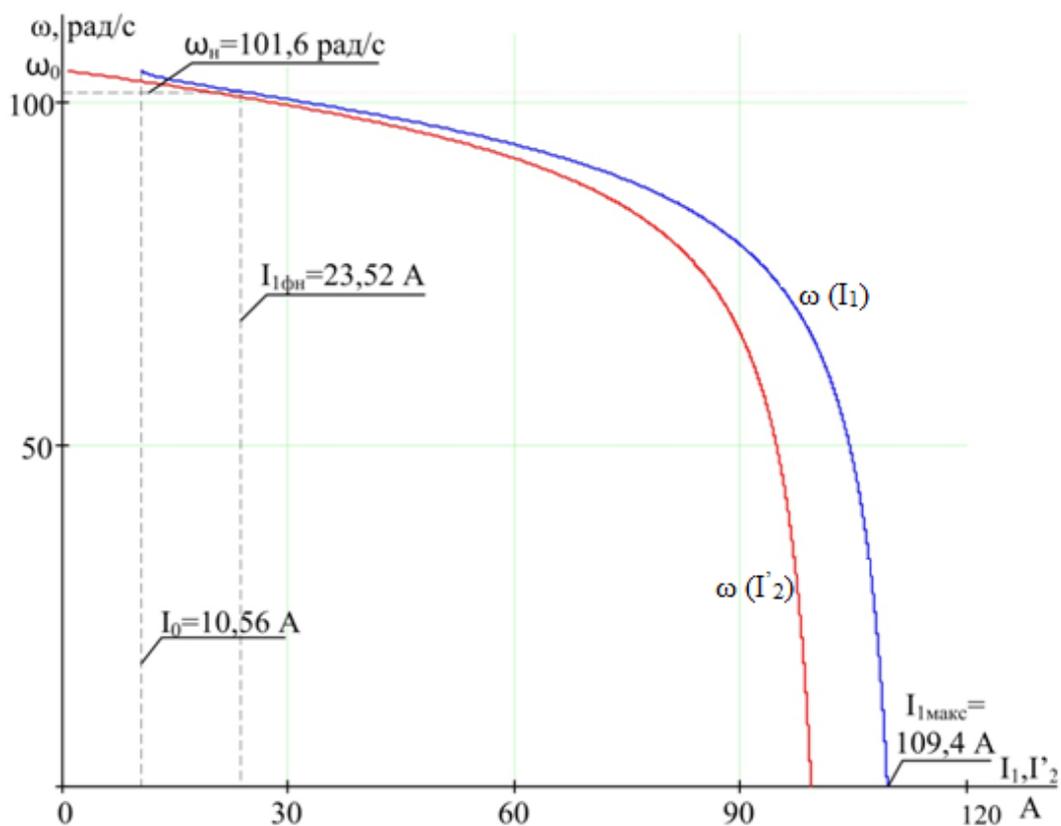


Рисунок 5 – Естественные электромеханические характеристики двигателя  $\omega(I_1)$  и  $\omega(I_2)$

В результате расчёта естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 3\% ; \quad s_K = 15,3\% ; \quad I_{1H} = 23,52 \text{ A} ; \quad I_{1\text{макс}} = 109,4 \text{ A} ;$$

$$I_{1\text{макс}} / I_{1H} = 4,68 \text{ A} ; \quad M_{\text{эм.н}} = 115,14 \text{ Н}\cdot\text{м} ; \quad M_{\text{эм.к}} = 279,7 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

$$M_{\text{эм.к}} / M_{\text{эм.н}} = 2,42 ; \quad M_{\text{эм.пуск}} = 93 \text{ Н}\cdot\text{м} ; \quad M_{\text{эм.пуск}} / M_{\text{эм.н}} = 0,8 ;$$

Справочные и расчётные параметры двигателя:

$$s_H = 3\% ; \quad s_K = 15,9\% ; \quad I_{\text{дв.н}} = 23,36 \text{ A} ; \quad I_{\text{дв.макс}} = 151,84 \text{ A}$$

$$I_{\text{дв.макс}} / I_{\text{дв.н}} = 6,5 ; \quad M_{\text{дв.н}} = 108,3 \text{ Н}\cdot\text{м} ; \quad M_K = 270,7 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

$$M_K / M_{\text{дв.н}} = 2,5 ; \quad M_{\text{дв.пуск}} = 205,7 \text{ Н}\cdot\text{м} ; \quad M_{\text{дв.пуск}} / M_{\text{дв.н}} = 1,899$$

Сравнения параметров расчётных характеристик со справочными параметрами двигателя показывают соответствие условиям для их характерных

точек  $M_{ЭМ.н} > M_{ДВ.н}$ ,  $M_{ЭМ.к} > M_{к}$ . Условие  $M_{ЭМ.пуск} > M_{ДВ.пуск}$  не выполняется, поэтому часть характеристики  $\omega(M)$  показана пунктиром.

## 2.4 Выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы двигателя

Для регулируемого асинхронного электропривода подъема мостового крана используем преобразователь серии Mitsubishi FR-F740-00250 [13], параметры которого приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры преобразователя частоты Mitsubishi

Модель	Число фаз на входе	$U_n$ , В	$I_{и.н}$ , А	$I_{и.макс}$ , А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
Mitsubishi FR-F740-00250	3	380	25	30	11

Общие технические данные преобразователя частоты Mitsubishi:

- коэффициент мощности 0,8;
- КПД не менее 0,96;
- выходная частота 0,5÷400 Гц;
- частота ШИМ 0,7÷14,5 кГц, (принимается 10 кГц).

Способ управления – векторный.

К электроприводам механизмов подъема мостовых кранов предъявляются наиболее жесткие требования, поэтому был выбран векторный способ управления. Использование преобразователя частоты с векторным управлением позволит повысить скорость перемещения и точность останова груза, за счет ограничения рывка и ускорения обеспечить отсутствие ощутимых толчков при старте и останове, увеличить срок службы основных механических узлов – тяговых тросов, тормозных колодок, редукторов, подвески противовеса.

Эквивалентные индуктивности обмоток статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,002823 + 0,063 = 0,066 \text{ Гн}; \quad (2.39)$$

ротора, приведённой к цепи статора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,003773 + 0,063 = 0,067 \text{ Гн}; \quad (2.40)$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,063^2}{0,066 \cdot 0,067} = 0,096. \quad (2.41)$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_{1\text{Э}} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L'_2{}^2} = 0,339 + 0,328 \cdot \frac{0,063^2}{0,067^2} = 0,632 \text{ Ом}. \quad (2.42)$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\text{Э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\text{Э}}} = \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,632} = 0,01 \text{ с}. \quad (2.43)$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,067}{0,328} = 0,205 \text{ с}. \quad (2.44)$$

## 2.5 Расчет характеристик двигателя при векторном управлении и проверка выбора двигателя и преобразователя

В плоскости механической характеристики  $\omega(M)$  рисунка 2.4 рассчитаны и построены:

1. Характеристика электромагнитного номинального момента  $M_{\text{ЭМ.Н}} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

2. Характеристика статического момента максимальной нагрузки  $M_{\text{С ЭМ.макс}}(\omega) = M_{\text{С макс}}(\omega) + \Delta M_{\text{С ДВ}}$ , где,

$$M_{\text{С макс}} = M_{\text{гр.макс}} = (1 + a + b) \left( \frac{m_{\text{г}} \cdot g}{\alpha} \cdot R_6 \right) \frac{1}{i_{\text{ред}}}, \quad (2.45)$$

где  $a = b = \frac{1 - \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}}$  - коэффициенты постоянных (a) и переменных

(b) потерь механизма,  $\eta_{\text{пер}} = 0,96$ ;  $\eta_{\text{ред}} = 0,98$ .

$m_{\text{гр}} = 10 \cdot 10^3 \text{ кг}$  - масса груза;

$R_6 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - радиус барабана;

$$M_{c \text{ макс}} = (1 + 0,031 + 0,031) \left( \frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c \text{ эм. макс}}(\omega) = 98 + 6,8 = 104,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Характеристика статического момента минимальной нагрузки

$M_{c \text{ эм. мин}}(\omega) = M_{c \text{ мин}}(\omega) + \Delta M_{c \text{ дв}}$ , где

$$M_{c \text{ мин}}(\omega) = a \cdot \left( \frac{m_{\text{гр}} \cdot g}{\alpha} \cdot R_6 \right) \frac{1}{i_{\text{ред}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.46)$$

$$M_{c \text{ мин}}(\omega) = 0,031 \cdot \left( \frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c \text{ эм. мин}}(\omega) = 2,8 + 6,8 = 9,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Зависимость длительно допустимого момента электродвигателя

$M_{\text{эм. длит. доп}}(\omega)$  по выражению:

$$\begin{cases} M_{\text{эм. длит. доп}}(\omega) = \left( k + (1 - k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \cdot M_{\text{эм.н}} & \text{при } 0 < \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ M_{\text{эм. длит. доп}}(\omega) = M_{\text{эм.н}} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}, & \text{при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}. \end{cases}$$

где  $k = 0,95$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя при неподвижном роторе.

5. Значение  $M_{\text{эп. макс}}$  соответствующее максимальному току электропривода  $I_{\text{эп. макс}}$ . Для этого на естественной электромеханической характеристике определено соответствующее  $I_{\text{эп. макс}} = I_{\text{и. макс}}$  значение

скольжения  $s_{T.1} = \frac{\omega_0 - \omega_{T.1}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 100,43}{104,7} = 0,041$  и при этом скольжении

найден значение максимального электромагнитного момента

$$M_{\text{эм.макс}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_{T.2} \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_{T.2}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{T.2} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,328}{104,72 \cdot 0,041 \cdot \left[ (2,112)^2 + \left( 0,339 + \frac{0,328}{0,041} \right)^2 + \left( \frac{0,339 \cdot 0,328}{0,041 \cdot 19,925} \right)^2 \right]} = 149,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В плоскости электромеханической характеристики  $\omega(I_1)$  рисунка 6 рассчитаны и построены:

1. Зависимость максимальной нагрузки:

$$I_{\text{с макс}}(\omega) = \sqrt{\left( \frac{M_{\text{с эм.макс}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + I_0^2 =$$

$$= \sqrt{\left( \frac{104,8}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + 10,56 = 21,9 \text{ А.} \quad (2.47)$$

где при  $\omega \leq \omega_{\text{дв.н}}$   $\Psi_{2d} = \Psi_{2н}$ ;

2. Зависимость от скорости длительно допустимого тока электродвигателя

$$I_{1\text{ф длит.доп}}(\omega) = \begin{cases} I_{1\text{фн}} \cdot \left[ k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right] & \text{при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ I_{1\text{фн}} & \text{при } \omega > 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \end{cases}$$

3. Номинального тока инвертора  $I_{\text{и.н}} = 25 \text{ А};$

4. Максимального тока инвертора  $I_{\text{и.макс}} = 30 \text{ А};$

5. Выбранного кратковременно допустимого (максимального) тока двигателя в пуско-тормозных режимах

$$I_{1\text{ф кратк.доп}}(\omega) \leq I_{\text{и. макс}}$$

или соответствующего значению выбранного выше кратковременно допустимого (максимального) электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{эм.кратк.доп}}(\omega)$

$$I_{1\text{ф.кратк.доп}}(\omega) = I_{\text{эм.макс}}(\omega) = \sqrt{\left( \frac{M_{\text{эм.кратк.доп}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + I_0^2} =$$

$$= \sqrt{\left( \frac{149,65}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 10,56} = 29,363 \text{ А.} \quad (2.48)$$

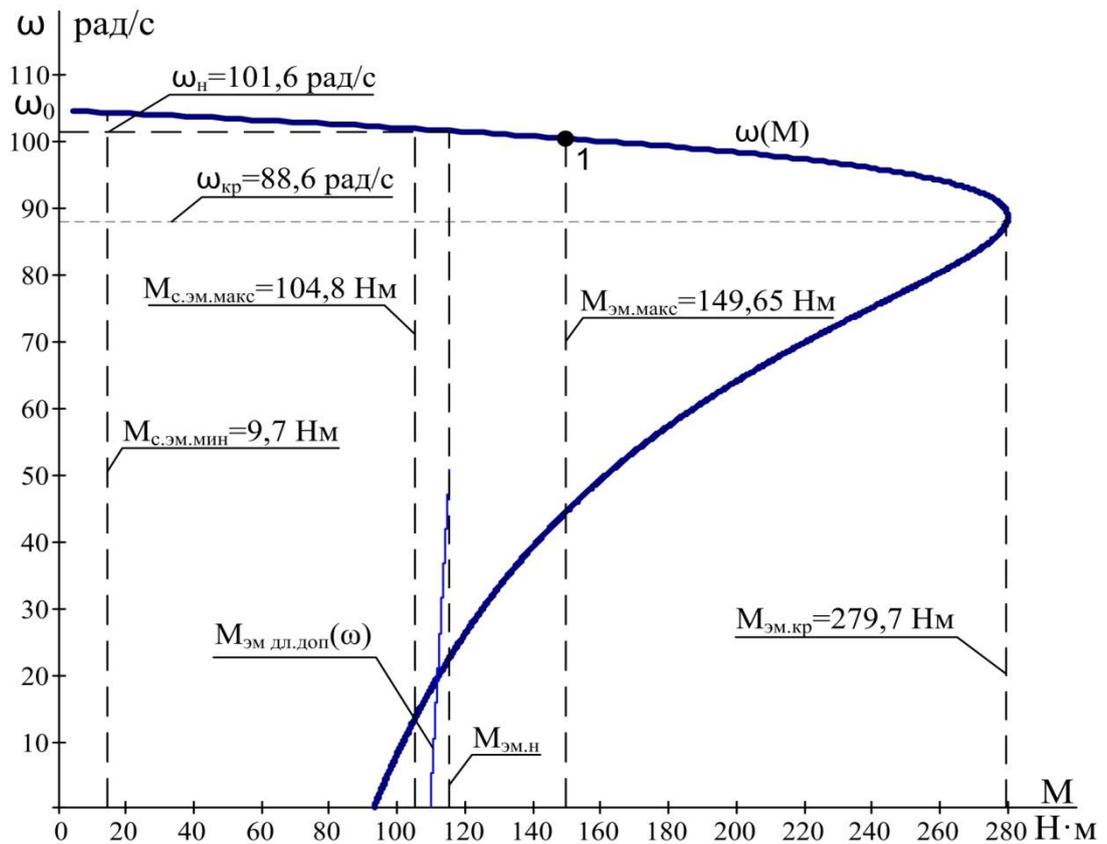


Рисунок 6 – Механическая характеристика электропривода и нагрузки  $\omega(M)$  при векторном управлении

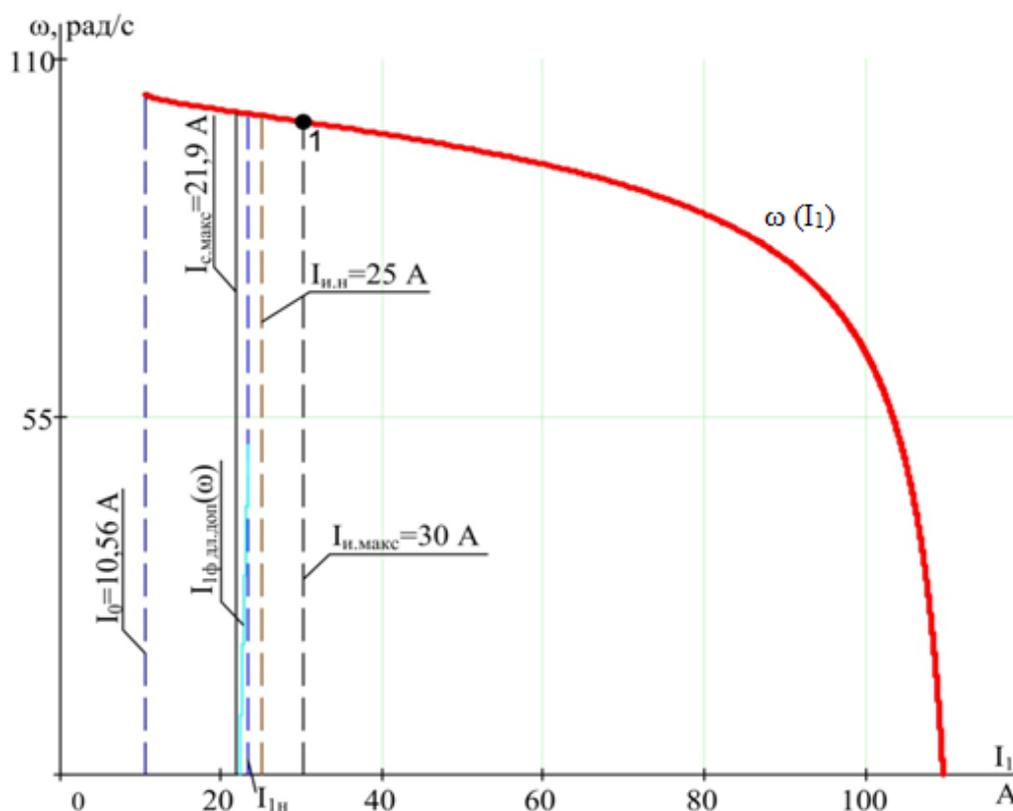


Рисунок 7 – Электромеханическая характеристика электропривода  $\omega(I_1)$  и нагрузки при векторном управлении

Анализ приведенных на рисунке 2.4 механической характеристики электропривода  $\omega(M)$  и нагрузки  $M(\omega)$  показывает, что во всем диапазоне регулирования скорости выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) &\geq M_{\text{с.макс}} \\ M_{\text{дв.макс}}(\omega) &\geq M_{\text{эп.макс}} \end{aligned} \right\},$$

следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода  $\omega(I_1)$  (рисунок 2.5) во всем диапазоне регулирования скорости имеем:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}},$$

что подтверждает правильность выбора двигателя по току.

На рисунке 2.5 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики, соответствующие номинальному и максимально допустимому току преобразователя:  $I_{\text{н.н}} = 25 \text{ A}$ ,  $I_{\text{н.макс}} = 30 \text{ A}$ . Из рисунка видно, что условие

$I_{И.Н.} \geq I_{с.макс}$  выполняется, следовательно преобразователь по току выбран правильно.

## 2.6 Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с векторным управлением

Поскольку жесткость статических характеристик разомкнутой системы преобразователь – двигатель оказывается меньше жесткости естественных характеристик двигателя, то, очевидно, что необходимо иметь некоторый запас по напряжению питающей сети для обеспечения требуемой максимальной рабочей скорости электропривода и его быстродействия.

Напряжение питающей сети выбираем из следующего условия:

– при скорости двигателя  $\omega^* = \omega_{ЭП.макс}$  преобразователь должен обеспечивать ток  $I_{1\phi}^* \geq I_{с макс}$  (максимальное быстродействие электропривода достигается при выполнении условия  $I_{1\phi}^* \geq I_{1\phi макс}$ ).

При выбранных значениях максимальной скорости  $\omega^*$  и тока  $I_{1\phi}^*$  рассчитаны требуемые значения:

– составляющей тока  $I_{1q}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$ :

$$I_{1q}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(I_{1\phi}^*)^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{21,9^2 - 10,56^2} = 27,13 \text{ А}; \quad (2.49)$$

– частоты питающего напряжения:

$$\begin{aligned} f_1^* &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \omega^* \cdot z_p + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}^*}{\Psi_{2н}} \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left( 101,6 \cdot 3 + 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot \frac{27,13}{0,909} \right) = 49,97 \text{ Гц}; \end{aligned} \quad (2.50)$$

– составляющей напряжения  $U_{1d}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$ :

$$U_{1d}^* = \left( \frac{R_{1э}}{L_m} - R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \right) \cdot \Psi_{2н} - 2\pi \cdot f_1^* \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}^*, \text{ В} \quad (2.51)$$

$$U_{1d}^* = \left( \frac{0,632}{0,063} - 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067^2} \right) \cdot 0,909 - 2\pi \cdot 49,97 \cdot 0,096 \cdot 0,066 \cdot 27,13 = -49,52 \text{ В};$$

– составляющей напряжения  $U_{1q}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$ :

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot f_1^* \cdot \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \cdot \Psi_{2н} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot \Psi_{2н} \cdot z_p \cdot \omega^* + R_{1э} \cdot I_{1q}^*, \text{ В} \quad (2.52)$$

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot 49,97 \cdot \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,063} \cdot 0,909 + \frac{0,063}{0,067} \cdot 0,909 \cdot 3 \cdot 101,6 + 0,632 \cdot 27,13 =$$

$$= 307,456 \text{ В};$$

– фазного напряжения трехфазного двигателя:

$$U_{1\phi}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(U_{1d}^*)^2 + (U_{1q}^*)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(-49,52)^2 + (307,456)^2} = 220,2 \text{ В}; \quad (2.53)$$

– напряжения звена постоянного тока преобразователя:

$$U_d^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi}^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 220,2 = 539,39 \text{ В}; \quad (2.54)$$

– напряжения питающей сети:

$$U_c^* = \frac{U_d^*}{1,35} = \frac{539,39}{1,35} = 399,5 \text{ В}. \quad (2.55)$$

## 2.7 Имитационная модель электрической части силового канала

Пример реализации имитационной модели следящего асинхронного электропривода с векторным управлением, учитывающий квантование сигналов обратных связей по уровню и времени и сигналов управления по времени, приведен на рисунке 2.6.

Имитационная модель асинхронного электропривода с векторным управлением состоит из следующих функциональных элементов:

- источник трехфазного переменного тока неограниченной мощности;
- реактор на стороне питающей сети;
- неуправляемый диодный выпрямитель;
- конденсатор в звене постоянного тока;
- инвертор напряжения на *IGBT* транзисторах;

- модели асинхронного двигателя;
- цепь разряда конденсатора, состоящая из тормозного резистора и транзисторного ключа.

Система управления электропривода реализована как многоконтурная система регулирования и включает в себя модели:

- контура регулирования тока  $I_{1d}$  с ПИ-регулятором;
- контура регулирования тока  $I_{1q}$  с ПИ-регулятором;
- контура регулирования скорости (рисунок 8) двигателя  $\omega_{дв}$  с ПИ-регулятором;
- контура регулирования потокосцепления ротора (рисунок 2.8)  $\Psi_{2d}$  с ПИ-регулятором;
- преобразователей координат управляющих напряжений;
- формирователя регулируемых координат привода в общем случае с датчиками токов, потоков и скорости двигателя.

В данном случае принята модель двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$ . Предполагается, что токи  $I_{1d}$ ,  $I_{1q}$  и потокосцепление ротора  $\Psi_{2d}$  измеряются аналоговыми датчиками, а затем аналоговый сигнал оцифровывается с помощью АЦП. Скорость вращения двигателя может измеряться с помощью аналогового датчика скорости, установленного на валу двигателя, а положение исполнительного органа механизма – импульсным датчиком, установленным на выходном валу механизма.

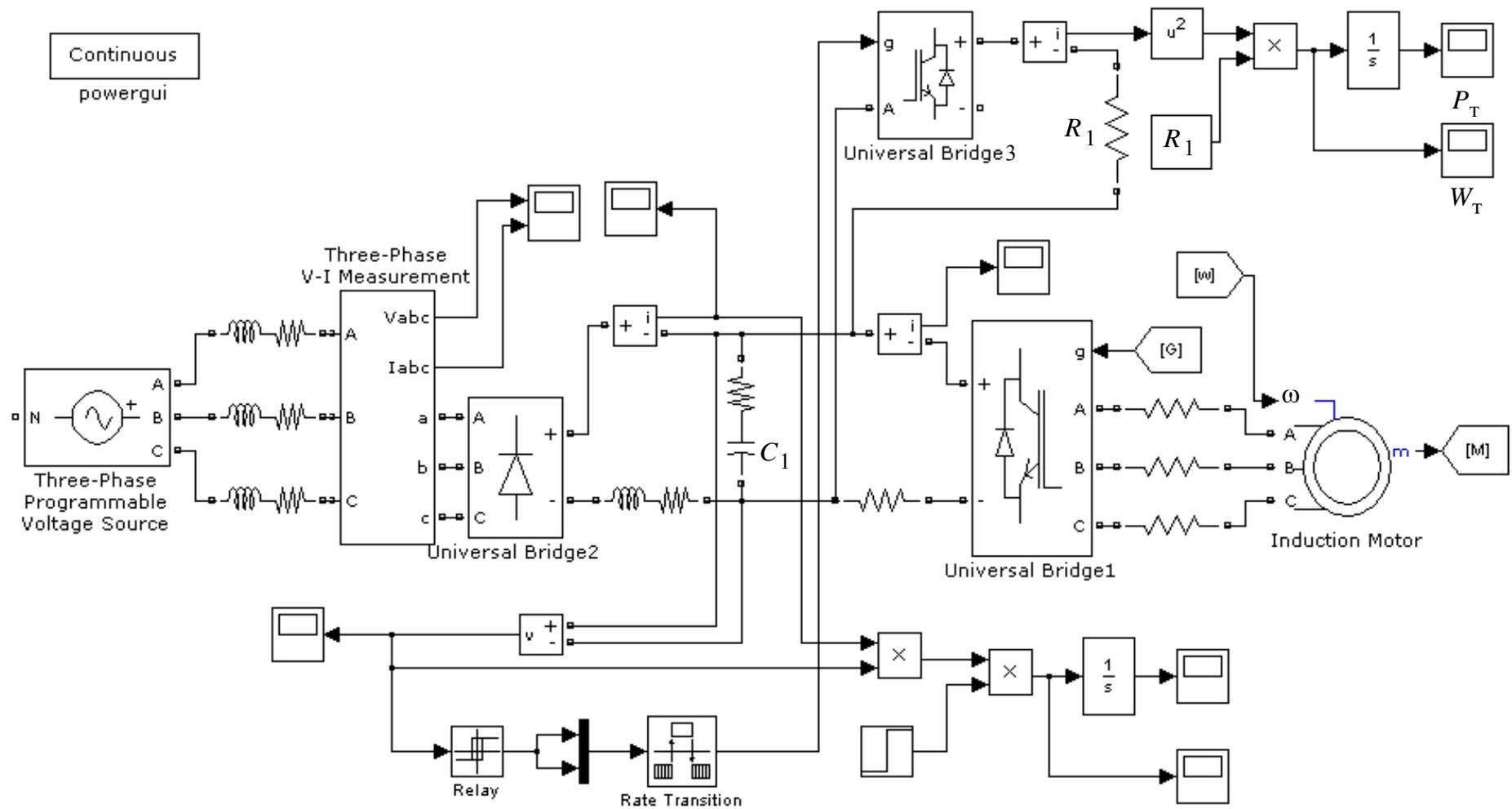


Рисунок 8 – Имитационная модель электрической части силового канала системы преобразователь частоты-асинхронный электродвигатель

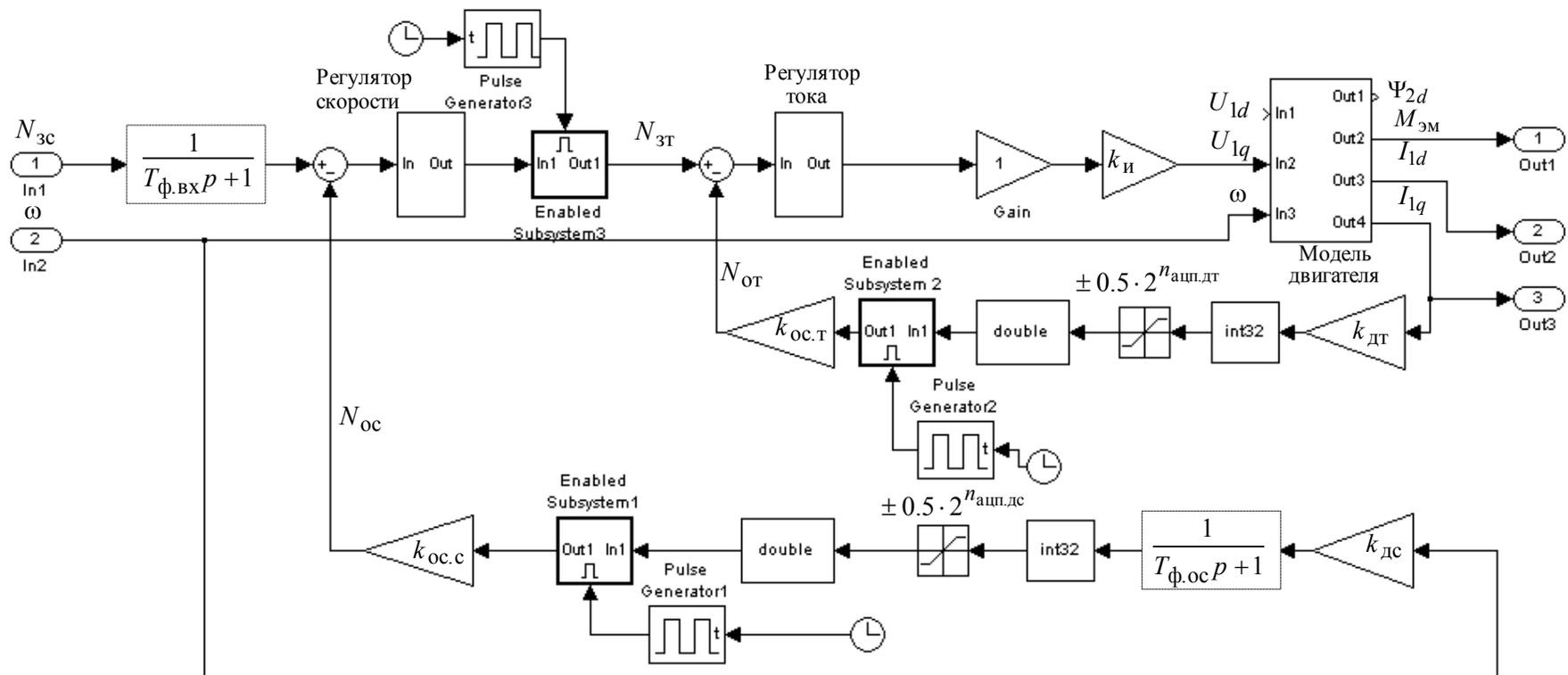


Рисунок 9 – Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком и внутренним контуром тока  $I_{1q}$

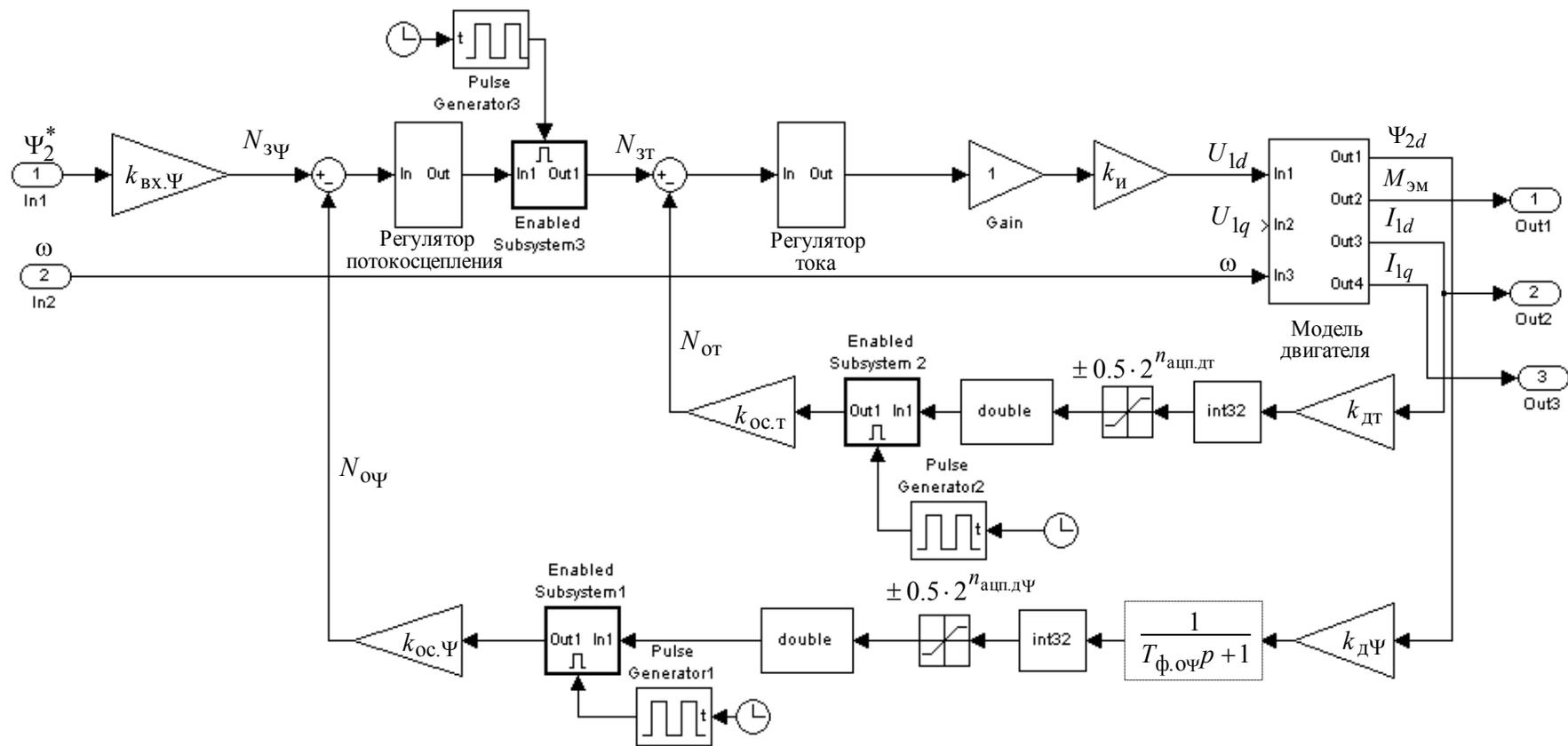


Рисунок 10 – Имитационная модель контура потокосцепления с внутренним контуром тока  $I_{1d}$

## 2.8 Методика настройки контуров регулирования САУ асинхронного электропривода

В многоконтурной системе управления подчиненного регулирования электропривода регуляторы включены последовательно. Расчет управлений начинается с внешнего контура. Регулятор контура рассчитывает управление после того, как будут определены сигнал задания на входе контура  $N_{zi}$  и сигнал обратной связи  $N_{oi}$ . Сигнал обратной связи рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала  $T_{oc.i}$  в цепи обратной связи. Выходной сигнал регулятора рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала  $T_{пк.i}$  в прямом канале контура. Рассчитанное регулятором тока управление подается на ключи инвертора только на следующем интервале ШИМ, т.е. с временной задержкой  $T_{зу.и} = T_{шим}$ . Наибольшее быстродействие электропривода достигается при максимальном быстродействии внутреннего контура тока  $I_{1q}$ .

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции  $T_{шим}$

$$T_{и} = T_{шим} = \frac{1}{f_{шим}} = \frac{1}{10000} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad (2.56)$$

где  $f_{шим} = 10000$  Гц – несущая частота инвертора (частота ШИМ).

Максимальные значения действующего и амплитудного фазного напряжения двигателя принимаем, соответственно, равными:

$$U_{1фн} = 220 \text{ В}; \quad U_{1фm} = \sqrt{2} \cdot U_{1фн} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В}.$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1н}}{\gamma_{\text{макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0,95} = 567,25 \text{ В}, \quad (2.57)$$

где  $\gamma_{\text{макс}} < 1$  – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора, примем  $\gamma_{\text{макс}} = 0,95$  о.е.,

тогда требуемое значение линейного напряжения источника питания преобразователя

$$U_c = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35 \div 1,41} = 401 \div 420 \text{ В}; \quad (2.58)$$

Принимаем коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{И}} = \frac{U_{\text{д}}^*}{\sqrt{3}} = \frac{539,39}{\sqrt{3}} = 311,419. \quad (2.59)$$

### 2.8.1 Контур тока с ПИ-регулятором и датчиком тока

Контуры токов  $I_{1d}$  и  $I_{1q}$  реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры. Аналоговые сигналы с первичных преобразователей тока двух фаз обмотки статора преобразуются с помощью АЦП в цифровые сигналы. В цепи измерения токов могут быть установлены аналоговые сглаживающие фильтры.

Параметры элементов контура тока:

$$k_{\text{ДТ}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дт}}}}{\sigma_{\text{Т}} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{Эп.макс}})} = \frac{0,5 \cdot 4096}{1,2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 29,36)} = 41 \text{ 1/А}, \quad (2.60)$$

где  $\sigma_{\text{Т}}$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока, принято  $\sigma_{\text{Т}} = 1,2$ ;

$n_{\text{ацп.дт}} = 12$  – разрядность АЦП датчика тока преобразователя;

Интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{\text{ос.т}} = n_{\text{ос.т}} \cdot T_{\text{шим}} = 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad (2.61)$$

где  $n_{\text{ос.т}} \geq 1$  – количество периодов модуляции для измерения тока, при частоте, принято  $n_{\text{ос.т}} = 1$ ;

$T_{\text{пк.т}} \leq T_{\text{ос.т}}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура тока, с;

$T_{зу.и} = T_{шим} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  – интервал времени задержки подачи управления

от регулятора тока к ключам инвертора;

$T_{ф.от}$  – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения

тока,  $T_{ф.от} = 0$  т.к. фильтр отсутствует;

$N_{зт.макс}$  – максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока электропривода  $I_{эп.макс}$ , в относительных единицах

$$N_{зт.макс} = \frac{1}{\sigma_T} = \frac{1}{1,2} = 0,833. \quad (2.62)$$

Расчетные параметры настройки контура тока:

Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W(p)_{рТ} = k_{рТ} \cdot \frac{T_{рТ} \cdot p + 1}{T_{рТ} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора:

постоянная времени регулятора тока:

$$T_{рТ} = T_{1э} = 0,01 \text{ с};$$

коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{рТ} = \frac{T_{1э} \cdot R_{1э}}{k_{и} \cdot k_{Т} \cdot a_{Т} \cdot T_{\muТэ}} = \frac{0,01 \cdot 0,632}{311,419 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 3,4 \quad (2.63)$$

где

$$k_{Т} = \frac{N_{зт.макс}}{\sqrt{2} \cdot I_{эп.макс}} = \frac{1}{\sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{эп.макс}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 29,36} = 0,02 \text{ 1/А}, \quad (2.64)$$

– коэффициент обратной связи по току;

$$T_{\muТэ} = \frac{T_{ос.Т}}{n_{Т}} + T_{зу.и} + T_{ф.от} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (2.65)$$

–малая постоянная времени оптимизированного контура тока;

$n_T = 1 \div 3$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят  $n_T = 2$  – настройка контура тока близка к типовой настройке на МО ( $\sigma < 5\%$ );

$a_T = 2$  – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО).

Достигнуто максимальное быстродействие контура тока, т.к.  $T_{ос.т} = T_{пк.т} = T_{шим}$ .

Для ограничения управления инвертором на заданном уровне  $\gamma_{\max}$  значения выходных сигналов регуляторов токов  $I_{1d}$  и  $I_{1q}$  должны удовлетворять условию

$$\gamma_{\max}^2 = N_{ртd}^2 + N_{ртq}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора  $I_{1d}$ , тогда допустимое значение его выходного сигнала ограничивается на постоянном уровне

$$N_{ртd \text{ доп}} = \gamma_{\max} = 0,95,$$

а допустимое значение выходного сигнала регулятора тока  $I_{1q}$  в процессе работы ограничено в соответствии с условием:

$$N_{ртq \text{ доп}} = \sqrt{\gamma_{\max}^2 - N_{ртd}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока

$$k_{ос.т} = \frac{k_T}{k_{дт}} = \frac{8,503 \cdot 10^{-3}}{17,414} = 4,883 \cdot 10^{-4}. \quad (2.66)$$

### 2.8.2 Контур скорости с ПИ-регулятором и датчиком скорости

Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком приведена на рисунке 2.7. Аналоговый сигнал с аналогового датчика скорости (например, тахогенератора постоянного тока) преобразуется с помощью АЦП в

цифровой сигнал. В состав аналогового датчика скорости может быть включен аналоговый фильтр.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{Т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{Т}} \cdot p + 1},$$

где

$$T_{\text{Т}} = a_{\text{Т}} \cdot T_{\text{мтэ}} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (2.67)$$

– эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Параметры элементов контура скорости с аналоговым датчиком:

$n_{\text{анп.дс}} = 14$  – разрядность АЦП датчика скорости;

$$k_{\text{дс}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{анп.дс}}}}{\sigma_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{эл.макс}}} = \frac{8192}{1,5521 \cdot 101,5} = 52 \quad (2.68)$$

– коэффициент передачи датчика скорости, с/рад;

где  $\sigma_{\text{с}} = 1,5521$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости;

$T_{\text{ос.с}} = 1/1000 \text{ с}$  – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура скорости;

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{с}}} = \frac{1}{1,5521} = 0,644 \quad (2.69)$$

– максимальное значение задания на входе контура скорости, соответствующее значению максимальной скорости привода  $n_{\text{эл.макс}}$ .

Расчетные параметры настройки контура скорости с аналоговым датчиком:

Передаточная функция регулятора скорости:

– ПИ-регулятора

$$W(p)_{\text{рс}} = k_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{\text{рс}} p + 1}{T_{\text{рс}} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора скорости:

– постоянная времени регулятора

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c3} = 2 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ c} \quad (2.70)$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{pc} = \frac{J_{\theta} \cdot k_T}{c_m \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c3}} = \frac{0,51 \cdot 0,02}{4 \cdot 6,348 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 250,27 \quad (2.71)$$

где

$$c_m = \Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p = 0,948 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 = 4 \quad (2.72)$$

– коэффициент электромагнитного момента двухфазного двигателя во вращающейся системе координат при номинальном потоке;

$$k_c = \frac{N_{\text{эс.макс}}}{\omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{0,644}{101,5} = 6,348 \cdot 10^{-3} \text{ c / рад} \quad (2.73)$$

– коэффициент обратной связи по скорости;

$$T_{\mu c3} = T_T + \frac{T_{\text{ос.с}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{2} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ c} \quad (2.74)$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

$n_c = 2$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;

$b_c = a_c = 2$  – коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум с ПИ-регулятором.

Для ограничения тока двигателя на заданном уровне  $I_{1\text{макс}}$  значения выходных сигналов регуляторов потокосцепления и скорости в общем случае должны удовлетворять условию

$$N_{\text{зт.макс}}^2 = N_{\text{р}\Psi}^2 + N_{\text{pc}}^2.$$

В качестве приоритетного следует выбрать текущее значение выходного сигнала регулятора потокосцепления, тогда допустимое значение выходного

сигнала регулятора скорости в процессе работы должно поддерживаться в соответствии с условием:

$$N_{\text{рс. доп}} = \sqrt{N_{\text{эт. макс}}^2 - N_{\text{р}\Psi}^2} = \sqrt{0,644^2 - N_{\text{р}\Psi}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов датчика обратной связи и задания на входе контура скорости:

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{дс}}} = 1,221 \cdot 10^{-4}. \quad (2.75)$$

### 2.8.3 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и датчиком потока

Имитационная модель контура потокосцепления с аналоговым датчиком приведена на рисунке 2.8. Аналоговый сигнал с аналогового датчика потока преобразуется с помощью АЦП в цифровой сигнал. В состав аналогового датчика потока может быть включен аналоговый фильтр.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{т}} \cdot p + 1},$$

где

$T_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мтэ}}$  – эквивалентная постоянная времени оптимизированного

контура тока, с.

Параметры элементов контура потокосцепления с аналоговым датчиком:

$n_{\text{ацп. д}\Psi}$  – разрядность АЦП датчика потока;

$$k_{\text{д}\Psi} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп. д}\Psi}}}{\sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2\text{н}}} = \frac{2048}{1,1 \cdot 0,909} = 2048 \quad (2.76)$$

– коэффициент передачи датчика потока, 1/Вб,

где  $\sigma_{\Psi} = 1,1$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование потока;

$T_{oc.\Psi} = 10^{-3} c$  – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура потокосцепления;

$$N_{3\Psi.\max} = \frac{1}{\sigma_\Psi} = \frac{1}{1,1} = 0,909 \quad (2.77)$$

– максимальное значение задания на входе контура потокосцепления, соответствующее номинальному потокосцеплению ротора двигателя  $\Psi_{2H}$ .

Расчетные параметры настройки контура потокосцепления с аналоговым датчиком:

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{p\Psi} = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора потокосцепления ротора:

– постоянная времени регулятора

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0,205 c;$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi \cdot a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3}} = \frac{0,205 \cdot 0,02}{0,063 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 24,912 \quad (2.78)$$

где

$$k_\Psi = \frac{N_{3\Psi.\max}}{\Psi_{2H}} = \frac{0,909}{0,909} = 1 \frac{1}{Bб} \quad (2.79)$$

– коэффициент обратной связи по потоку;

$$T_{\mu\Psi_3} = T_T + \frac{T_{oc.\Psi}}{n_\Psi} + T_{\phi.o\Psi} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{1} + 0 = 1,3 \cdot 10^{-3} c \quad (2.80)$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

$n_\Psi = 1$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;

$a_\Psi = 2$  – коэффициент типовой настройки контура потокосцепления на модульный оптимум.

Коэффициент согласования выходного сигнала датчика потока и задания на входе контура потокосцепления

$$k_{\text{ос.}\Psi} = \frac{k_{\Psi}}{k_{\text{д}\Psi}} = 4,883 \cdot 10^{-4}. \quad (2.81)$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потокосцепления ротора ограничивается на постоянном уровне

$$N_{\text{р}\Psi \text{ доп}} = N_{\text{зт. макс}} = 0,833.$$

## **2.9 Исследования имитационной модели электропривода подъема мостового крана с учетом крановой нагрузки**

На рисунке 11 представлена модель электропривода механизма подъема в среде MATLAB SIMULINK.

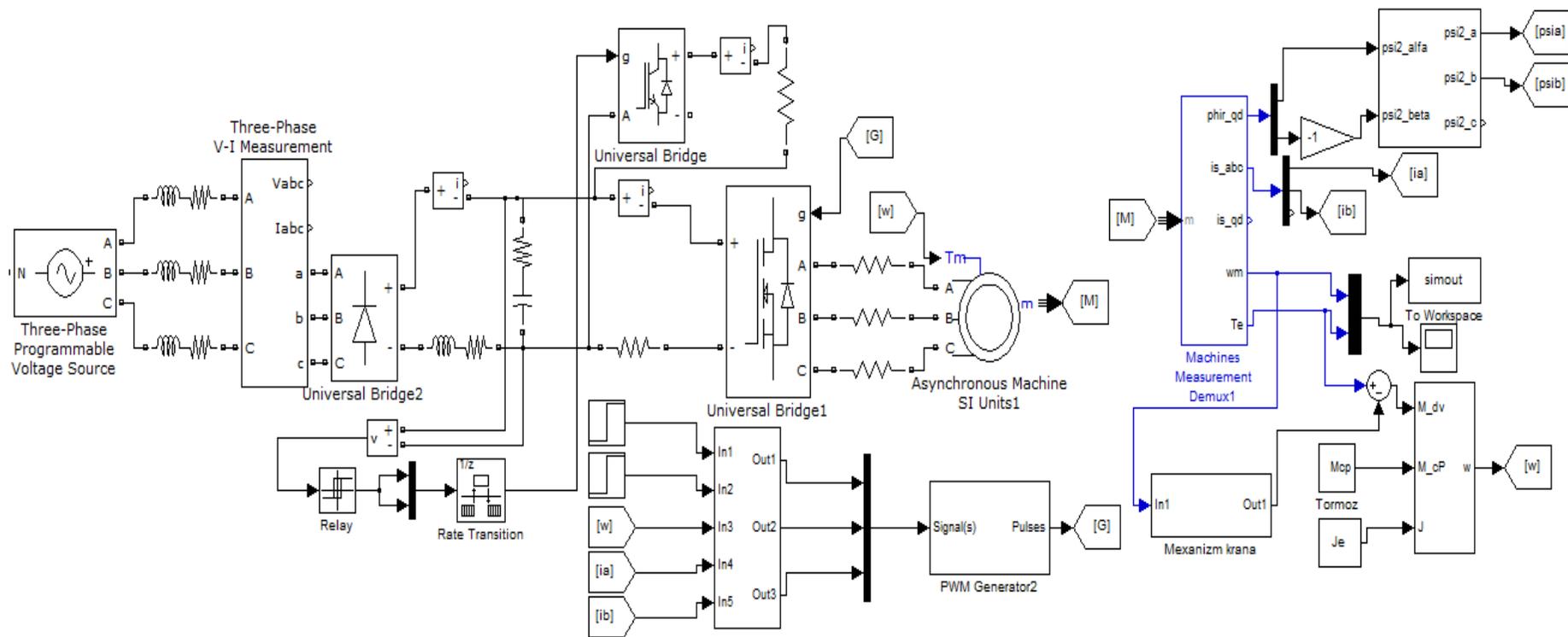


Рисунок 11 – Имитационная модель механизма подъема мостового крана

На рисунке 12 представлен пуск асинхронного двигателя без нагрузки на номинальную скорость  $\omega_{об.ном} = 101,5 \text{ рад/с}$ , а затем наброс нагрузки в момент времени  $t=0,5 \text{ сек}$   $M_{нагр} = 108 \text{ Нм}$ . Из графиков видно пусковые параметры двигателя:  $M_{эл.макс} = 149,5 \text{ Н·м}$ ,  $I_{эл.макс} = 29,3 \text{ А}$ ; параметры двигателя при работе без нагрузки на заданной скорости  $\omega_{зад} = 101,5 \text{ рад/с}$  при  $I_0 = 10 \text{ А}$  и параметры нагруженного двигателя. В момент нагрузки из графика видно что скорость незначительно уменьшается, но затем она достигает своего заданного значения  $\omega_{зад} = 101,5 \text{ рад/с}$ . При этом ток соответствует расчетному значению номинального тока двигателя  $I_{ф.ном} = 23,3 \text{ А}$ .

Данные переходные характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$  и  $I = f(t)$  позволяют утверждать, что все три контура регулирования рассчитаны и настроены верно, т.к. на представленных графиках не наблюдается перерегулирований, превышающих допустимых значений, выполняется точная обработка задающих воздействий, а так же все значения скоростей, токов и моментов совпадают с расчетными.

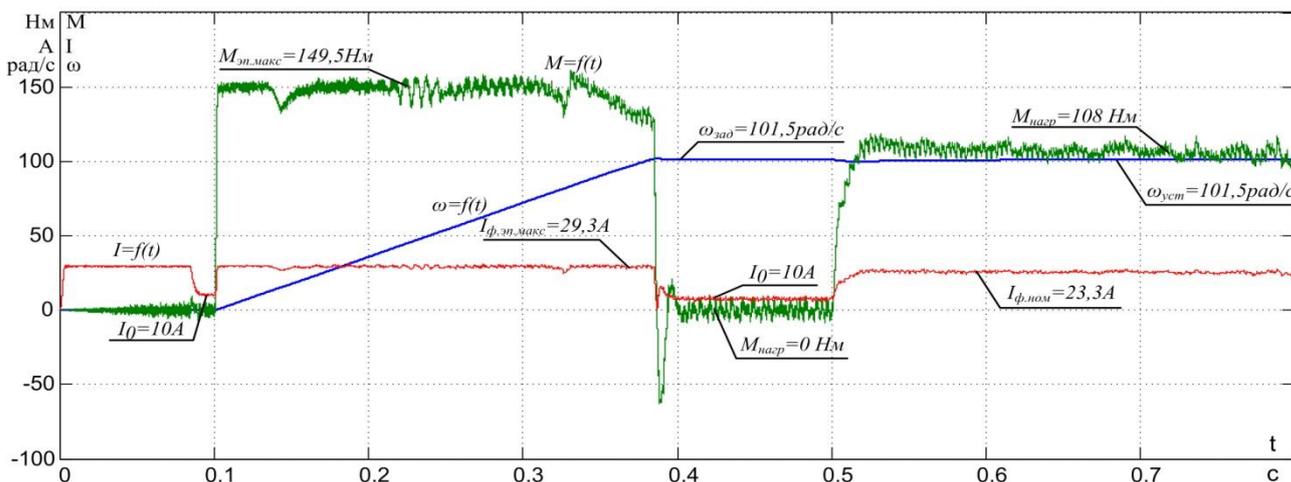


Рисунок 12 – Диаграммы электромагнитного момента  $M_{эм}(t)$ , скорости вращения  $\omega(t)$  и фазного тока  $i_{ф}(t)$  двигателя

На рисунке 4.2 представлены переходные характеристики скорости вращения ротора  $\omega(t)$  двигателя при задании на скорость  $\omega_{зад1}=101,5\text{рад/с}$  и  $\omega_{зад2}=1,01\text{рад/с}$ .

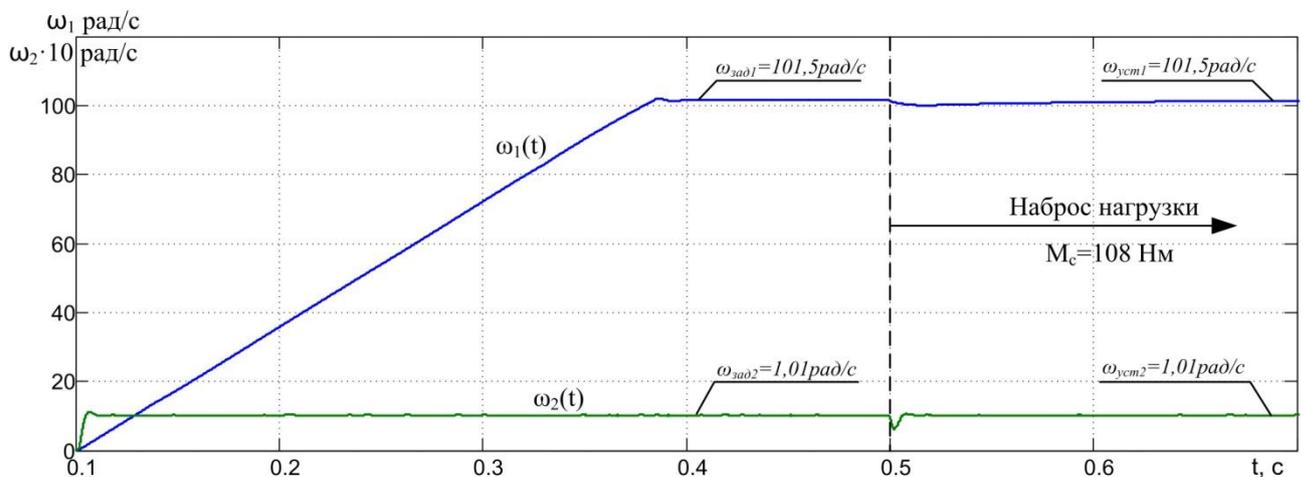


Рисунок 13 – Переходные характеристики скорости вращения ротора  $\omega(t)$  двигателя при различных заданиях скорости

Из графика, представленного на рисунке 13, вычислим диапазон регулирования скорости:

$$D = \frac{\omega_{зад1}}{\omega_{зад2}} = \frac{101,5}{1,01} = 100,5.$$

Диапазон регулирования соответствует требованиям, заявленным в техническом задании.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5Г4А1	Сапунов Сергей Игоревич

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы</b>	<b>ОЭЭ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
<i>1. Стоимость затрат технического проекта</i>	В техническом проекте были задействованы 2 человека, (руководитель, дипломник). Затраты на материальные ценности определяются согласно прейскуранту. Зарботная плата рассчитывается в соответствии с окладами сотрудников ТПУ.
<i>2. Продолжительность выполнения</i>	Приблизительная оценка продолжительности выполнения технического проекта определяется исходя из ожидаемой трудоёмкости работ.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<i>1. Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта</i>	Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT-анализа, оценивать технический проект выявляя при этом сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы
<i>2. Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта</i>	Составление графика по проектированию асинхронного электропривода ленточного конвейера. Определить трудоемкость работ для каждого исполнителя. По полученным данным построить диаграмму Ганта, которая позволяет спланировать процесс реализации технического проекта.
<i>3. Формирование сметы технического проекта</i>	В процессе формирования сметы технического проекта используется следующая группировка затрат по статьям: · материальные затраты; · полная заработная плата исполнителей; · отчисления во внебюджетные фонды; · накладные расходы
<i>4. Ресурсоэффективность технического проекта</i>	Оценка эффективности проекта производится с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности
<b>Перечень графического материала:</b>	
График Ганта	
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	11.03.2019г.

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н ,доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5Г4А1	Сапунов Сергей Игоревич		

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела выпускной квалификационной работы является подтверждение целесообразности разработки технического проекта, отвечающего всем нынешним требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка технического проекта при помощи SWOT-анализа;
- планирование проектно-конструкторских работ;
- расчет затрат на проектные работы электропривода ленточного конвейера;
- определение ресурсной эффективности проекта.

#### **3.1 SWOT-Анализ работы регулируемого электропривода переменного тока механизма подъема крана.**

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Он представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [13].

Применительно к проекту по разработке электропривода крана механизма подъема. SWOT-анализ позволит оценить положительные и отрицательные стороны проекта.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, которая помогает выявить соответствия слабых и сильных сторон проекта, а также их возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT-анализа стоит использовать следующие обозначения: **С** – сильные стороны проекта; **Сл** – слабые стороны проекта; **В** – возможности; **У** – угрозы.

Матрица SWOT приведена в таблице 1.

Таблица 6- Матрица SWOT-анализа технического проекта

	<b>Сильные стороны проекта:</b>	<b>Слабые стороны проекта:</b>
	С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации С3. Большая экономия потребляемой эл.энергии С4. Квалифицированный персонал С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание Оборудования	Сл1. Повышенный уровень шума Сл2. Аварийные ситуации Сл3. Значительная стоимость оборудования
<b>Возможности:</b> В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	V1 C1C2C3C4	V1 Сл2Сл3;
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	V2 C2C4C5	V2 Сл1Сл2
В3.Резервное питание электропривода крана механизма подъёма	V3 C1C2C4C5	V3 Сл2Сл3.
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	V4 C1C3C5	
<b>Угрозы:</b> У1. Развитая конкуренция технологии производства	У1 C5	У1 Сл3
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	У2 C5	
У3. Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	У3 C4	У3 Сл2

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие.

Анализ интерактивных матриц, приведен в таблицах 2 и 3

Таблица 7 – Интерактивная матрица возможностей

<b>Возможности</b>	<b>Сильные стороны проекта</b>				
	С1. Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С3. Большая экономия потребляемой эл.энергии	С4. Квалифицированный персонал	С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	+	+	+	+	-
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	-	+	-	+	+
В3. Резервное питание электропривода крана механизма подъема	+	+	-	+	+
В4. Повышения стоимости конкурентных разработок	+	-	+	-	+
<b>Возможности</b>	<b>Слабые стороны проекта</b>				
	Сл1. Повышенный уровень шума	Сл2. Аварийные ситуации	Сл3. Значительная стоимость оборудования		
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	-	+	+		
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	+	+	-		
В3. Резервное питание электропривода крана механизма подъема	-	+	+		
В4. Повышения стоимости конкурентных разработок	-	-	-		

Таблица 8 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта				
	С1.Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С3.Большая экономия потребляемой эл.энергии	С4. Квалифицированный персонал	С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
У1 Развитая конкуренция технологии производства	-	-	-	-	+
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	-	-	-	-	+
У3 Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	-	-	-	+	-
Угрозы	Слабые стороны проекта				
	Сл1 Повышенный уровень шума	Сл2 Аварийные ситуации	Сл3.Значительная стоимость оборудования		
У1 Развитая конкуренция технологии производства	-	-	+		
У2 Риск несвоевременной поставки оборудования	-	-	-		
У3 Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	+	-	-		

По результатам интерактивных матриц, приведенных выше, видно, что самой сильной стороной проекта является надежность защит в аварийной сигнализации, так как несвоевременное ликвидация ошибок и аварий может повлечь за собой опасность для жизни людей, а также нарушение технологического процесса. Кроме того, большая экономия потребляемой электрической энергии и высокое качество питающего напряжения показывают перспективность проекта в целом. Угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

### 3.2. Планирование технического проекта

Организация работ технического проекта осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- разработка графика проведения технического проектирования.

#### 3.2.1. Определение структуры работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Каждый вид запланированных работ закреплен за соответствующим исполнителем.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 9.

Таблица 9. Перечень этапов работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Исполнитель
Составление технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления технического проектирования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Выбор оборудования	Дипломник
	4	Расчет элементов электропривода	Дипломник
	5	Построение естественных и искусственных характеристик	Дипломник
	6	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель, Дипломник
	7	Расчет и проверка модели АД	Руководитель, Дипломник
	8	Расчет и проверка модели АД-ПЧ	Руководитель, Дипломник
Оформление отчета по техническому проектированию и защита ВКР	9	Составление пояснительной записки	Дипломник
	10	Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель, Дипломник

### 3.2.2 Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ.

№1 - Составление и утверждение технического задания – выбор направления исследований научным руководителем и составление плана работ;

№2 - Подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение первичных источников информации об объекте исследования;

№3 - Выбор оборудования – расчет мощности электропривода и его выбор по номенклатуре, также выбор преобразователя частоты ;

№4 – Расчет элементов электропривода - определение параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя;

№5 – Построение естественных и искусственных характеристик – расчет и построение естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик электродвигателя;

№6 - Проверка правильности выбора оборудования – проверка руководителем правильности выбора оборудования, оценка результатов, устранение недочетов;

№7 - Расчет и проверка модели АД – построение естественных механических и электромеханических характеристик в среде MATLAB при пуске под нагрузкой;

№8 - Расчет и проверка модели АД-ПЧ – расчет статических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, расчет и построение семейства механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при изменении частоты подаваемого напряжения в среде MATLAB.

№9 - Составление пояснительной записки - оформление результатов проектной деятельности;

№10 - Проверка и защита выпускной квалификационной работы - окончательная проверка руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовка презентации, размещение пояснительной записки в электронно-библиотечной системе ТПУ, защита выпускной квалификационной работы.

### 3.2.3 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 значения трудоемкости  $t_{ожi}$  используется следующая формула [13]

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}$$

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

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

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

Таблица 10. Диаграмма Ганта

Этап	Под этапы	Исп-ли	Раб дни	Продолжительность выполнения работ									
				Март		Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	
1.Подготовительный	1. Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	■									
	2 Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	7	■	■								
	3 Выбор оборудования	Дипломник	7		■	■							
	4 Расчет элементов электропривода	Дипломник	8			■	■						
2.Экспериментальный	5. Построение естественных и искусственных характеристик	Дипломник	6				■	■					
		Руководитель	1				■						
	6. Проверка правильности выбора оборудования	Дипломник	7					■	■				
	7. Расчет и проверка модели АД	Дипломник	9						■	■			
		Руководитель	1						■				
	8. Расчет и проверка модели АД-ПЧ	Дипломник	9							■	■		
Руководитель		1							■				
3.Заключительный	9. Составление пояснительной записки	Дипломник	6							■	■		
		Руководитель	2								■		
	10. Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Дипломник	5									■	■
		Руководитель	1										■

Результаты продолжительности выполнения работ приведены в таблице 11.

Таблица 11. Расчет продолжительности работ.

№ работы	Содержание работ	Трудоёмкость работ, раб. дни			
		Исполнитель	Минимально возможная трудоемкость	Максимально возможная трудоемкость	Ожидаемая трудоемкость
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	1	1
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	6	9	7
3	Выбор оборудования	Дипломник	5	10	7
4	Расчет элементов электропривода	Дипломник	7	14	8
5	Построение естественных и искусственных характеристик	Дипломник	5	8	6
6	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	6	9	7
7	Расчет и проверка модели АД	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	8	11	9
8	Расчет и проверка модели АД-ПЧ	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	8	11	9
9	Составление пояснительной записки	Дипломник	5	8	6
10	Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	1	3	2
		Дипломник	4	6	5

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 9 декад, начиная со второй декады марта, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 64 дня. Из них:

- 64 дня – продолжительность выполнения работ дипломника;
- 6 дней – продолжительность выполнения работ руководителя;

### 3.3 Составление сметы технического проекта

При планировании сметы технического проекта (ТП) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы ТП используется группировка затрат по следующим статьям:

- полная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.
- затраты на спец.оборудование;

### 3.3.1 Полная заработная плата исполнителей ВКР

В этом разделе включена основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, 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.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p,$$

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

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (таблица 1.6).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{тс} + Z_{р.к}}{F_d},$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$Z_{допл}$  – доплаты и надбавки, руб.;

$Z_{р.к.}$  – доплата с учетом районного коэффициента (30 %), руб.;

$F_d$  – количество рабочих дней в месяце, раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 12

Таблица 12– Расчёт основной заработной платы исполнителей

Исполнители	Оклад	Районная доплата, руб.	Зарплата месячная, руб	Среднедневная заработная плата в день, руб	Продолжительность работ, раб. дн	Основная заработная плата, руб
Руководитель	33664	10099	43763	1 683	6	10098
Дипломник	12300	3690	15990	615	64	39360
Итого						49458

Дополнительная заработная плата, составляет 12-15% от основной.

Расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 13

Таблица 13. – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб
Руководитель	0,15	10098	1514	11612
Дипломник	0,12	39360	4723	44083
Итого		49458	6237	55695

### 3.3.2 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), страхование от несчастных случаев; от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \times (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды

$k_{\text{внеб}} = 30,2\%$  в условиях ТПУ.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$Z_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 55,7 = 16,8$  тыс. руб.

### 3.3.3 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, и т.д. Величину накладных расходов принимаем в размере  $K_{\text{нр}}$ - 16% от общей суммы затрат.

### 3.3.4 Формирование сметы технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции. [13]

Определение затрат на технический проект приведен в таблице 14

Таблица 14 – Смета технического проекта

Статьи расхода	Сумма, тыс.руб.	Структура затрат %
1. Полная заработная плата научно-производственного персонала	55,7	64,5
2. Отчисления во внебюджетные фонды	16,8	19,5
3. Накладные расходы	13,8	16,0
<b>4. Итого</b>	<b>86,3</b>	<b>100,0</b>

Стоимость специализированного оборудования асинхронного электропривода крана механизма подъема приведена в таблице 15

Таблица 15. Стоимость специализированного оборудования [13].

Наименование	Кол-во	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая цена, руб
Электродвигатель МТКФ	2	38670	77340
Преобразователь	1	203019	203019
<b>Итого</b>	3	241 689	<b>280 359</b>

Первоначальная стоимость оборудования рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{ОБ}} = Ц \times k_{\text{тр}}$$

где:  $C_{\text{ОБ}}$  - первоначальная стоимость оборудования

$Ц$  - цена оборудование

$k_{\text{тр}}$  – коэффициент, учитывающий транспортные расходы,  $k_{\text{тр}}=1,1$

$$C_{\text{ОБ}} = 280,4 \times 1,1 = 300 \text{ тыс. руб.}$$

Исходя из представленной выше таблицы 9, можно сделать вывод, что смета затрат на выполнение технического проекта составляет 366,7 тыс.руб. включая заработную плату исполнителей работ. Большая часть (78,1 %) составляют затраты на спецоборудование.

### 3.4. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности: [13]

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  - весовой коэффициент разработки;

$b_i$  - балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны критерии эффективности такие как:

- повышение производительности труда пользователя осуществляется путем автоматизации технологического процесса;
- удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей) – возможность диспетчеризации позволяет сократить количество осмотров системы за период эксплуатации;
- энергоэкономичность – применение в подъемных механизмов частотно-регулируемого электропривода дает возможность использовать плавный подъем груза;
- надежность – отсутствие ударов при переключении на другие скорости подъема или спуска не изнашивается механизм;
- уровень шума – применение частотно-регулируемого электропривода значительно снижает уровень шума подъемного механизма;
- безопасность – нет необходимости постоянного присутствия обслуживающего персонала, так как управление и мониторинг за работой подъемного механизма осуществляется дистанционно.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик проекта.

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	10
2. Удобство в эксплуатации	0,15	9
3. Энергоэкономичность	0,25	10
4. Надежность	0,20	10
5. Ремонтпригодность	0,15	10
6. Безопасность	0,10	9
Итого:	1,00	7,75

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{\text{ABB}} = 10 \cdot 0,15 + 9 \cdot 0,15 + 10 \cdot 0,25 + 10 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,15 + 9 \cdot 0,1 = 7,75;$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 10-балльной шкале) 7,75, что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

В данном разделе выпускной квалификационной работы были рассмотрены, раскрыты и рассчитаны следующие вопросы:

1) В результате проведения SWOT-анализа были выявлены как сильные, так и слабые стороны технического проекта. Анализ установил, что соответствия угроз с сильными и слабыми сторонами имеют низкую вероятность, что нельзя сказать о возможностях. В итоге следует, что данный технический проект имеет несколько важных преимуществ, таких как высокая безопасность производства и энергоэффективность, которые обеспечат повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства;

2) При планировании технических работ была составлена ленточная диаграмма Ганта. Данная диаграмма позволяет оптимально спланировать время работы исполнителей проекта (руководителя и дипломника);

3) Составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта. По этим данным можно определить;

4) Оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала довольно высокий результат (7,75 по 10-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5Г4А1	Сапунов Сергей Игоревич

<b>Институт</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Отделение</b>	Электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: Регулируемый электропривод переменного тока механизма подъема крана.**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования является электропривод мостового крана. Кран применяется для транспортировки различных грузов в разных промышленных отраслях и предприятиях</i>
--	--

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Возрастное ограничение, требования к образованию. Специальные нормы, предусмотренные спецификой выполняемых работ. Эргономика кабины крана и ее оснащение.
<b>2. Производственная безопасность</b> 2.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды  2.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды  2.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов	Основными вредными факторами являются: - повышенная запыленность воздуха рабочей зоны; - повышенный уровень шума на рабочем месте; - повышенный уровень вибрации; - отклонение показателей микроклимата;  Опасными факторами являются: - движущиеся машины и механизмы; - повышенное значение напряжения в электрической цепи. - пожар
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Загрязнение окружающей среды смазочными материалами. Проведение мероприятий по утилизации.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Перечень возможных ЧС на объекте;  - защита электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок;

	- воспламенения изоляции в следствии повышения температуры;
--	---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г341	Сапунов Сергей Игоревич		

#### **4. Социальная ответственность**

##### **Введение**

В данном дипломном проекте проектируется электропривод переменного тока механизма подъема крана.

Краны являются одним из видов грузоподъемных сооружений, циклического действия. Бывают мостовыми, козловыми, башенными, порталными, плавучими и т.д. Предназначены для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, перемещаются по рельсовым путям, расположенным на значительной высоте от пола (мостовые краны), либо наземные (козловые).

Кран состоит из грузоподъемной тележки, включающей механизм подъема, грузозахватное устройство, механизм передвижения, и из моста, представляющего собой две сплошные (или решетчатые) фермы, присоединенные к концевым балкам, в которые вмонтированы приводные и не приводные колеса. Механизм передвижения моста и имеет привод от одного или двух двигателей.

Рабочим местом машиниста мостового электрического крана является кабина управления краном. Правильная, научно обоснованная организация рабочего места, учитывающая физиологические особенности организма человека и конкретные условия эксплуатации крана, способствует повышению производительности труда машиниста. Поэтому при организации рабочего места машиниста учитываются эргономические показатели кабины управления оптимальные значения параметров микроклимата, освещенность рабочей площадки и т. п. Конструкция кабины должна обеспечивать хороший обзор любой точки рабочей площадки, защиту машиниста от избыточного тепла, шума и вибраций, электробезопасность, легкость и удобство управления краном (ГОСТ 27584-88) [1].

#### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

До работ на кране допускаются только обученные и аттестованные крановщики не моложе 18 лет, имеющие образование не ниже 8 классов, годные по состоянию здоровья, что должно быть подтверждено результатами медицинского освидетельствования.

В соответствии со ст. 104 ТК РФ допускается введение суммированного учета рабочего времени с учетным периодом три месяца. В случае, если по причинам сезонного и (или) технологического характера, установленная продолжительность рабочего времени не может быть соблюдена в течение учетного периода продолжительностью три месяца, отраслевым (межотраслевым) соглашением и коллективным договором может быть предусмотрено увеличение учетного периода для учета рабочего времени таких работников, но не более чем до одного года. При этом продолжительность рабочего времени за учетный период не может превышать нормального числа рабочих часов.

При проведении работ в зимнее, то согласно ст 109 ТК РФ крановщик имеет право на перерывы на обогрев, которые входят в рабочее время.

Согласно ст.117 ТК РФ крановщику предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в силу условий труда, минимальная продолжительность которого составляет 7 календарных дней.

Согласно ст. 329 ТК РФ работникам, труд которых непосредственно связан с управлением транспортными средствами или управлением движением транспортных средств, не разрешается работа по совместительству, непосредственно связанная с управлением транспортными средствами или управлением движением транспортных средств.

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Для подъема на рабочее место машиниста на экскаваторе должна быть установлена безопасная лестница с высотой перил от поверхности ступени 850-950 мм.

Дверной проем должен иметь высоту не менее 1900 мм, ширину не менее 650 мм (для исполнения ХЛ - не менее 750 мм) с учетом уплотнения. Запорное устройство и уплотнение должны обеспечивать герметичность и безотказное открывание и закрывание двери.

Кресло должно создавать условия для поддержания корпуса человека в физиологически рациональном положении, в том числе за счет профилирования спинки и сиденья, а также обеспечивать условия для отдыха.

Кроме того кабина крановщика должна быть оборудована средствами или устройствами:

1) для предотвращения запотевания и обмерзания стекол при температуре наружного воздуха до минус 40 °С, по требованию заказчика для исполнения ХЛ по ГОСТ 15150 - до минус 55 °С;

2) для защиты глаз машиниста от прямых солнечных лучей (солнцезащитные козырьки, тонированные стекла и др.);

3) для очистки наружной поверхности лобового стекла от загрязнения и атмосферных осадков, обеспечивающими рациональные зоны очистки;

4) для установления, регулирования и поддержания комфортных микроклиматических условий;

5) для аварийного покидания кабины.

Остекление кабины должно быть устойчивым к механическому воздействию по ГОСТ 5727-88. Окна должны иметь форточки или частично открываться. Стекла по периметру должны иметь вибродемпфирующую прокладку.

## 4.2 Производственная безопасность

Таблица 17 – Опасные и вредные факторы при исследовании

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. повышенная запыленность воздуха рабочей зоны		+	+	ГОСТ 12.1.005-88
2. повышенный уровень шума на рабочем месте		+	+	ГОСТ 12.1.003-83 СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002
3. повышенный уровень вибрации		+	+	ГОСТ 33173.5—2014
4. отклонение показателей микроклимата		+	+	СанПиН 2.2.4.548-96
5. движущиеся машины и механизмы;				ГОСТ 12.2.062-81 [27].
6. повышенное значение напряжения в электрической цепи.				ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ
7. - пожар				СП 12.13130-2009

### 4.2.1. Анализ вредных факторов, связанных с эксплуатацией крана

При работе на машиниста крана воздействуют вредные факторы.

*К вредным относятся:*

#### 1) повышенная запыленность воздуха рабочей зоны:

В гальванических, окрасочных, заготовительных и других цехах машинист работает в условиях повышенной запыленности и загазованности.

Неблагоприятное воздействие пыли на организм может быть причиной возникновения различных заболеваний: специфических (пневмокониозы, аллергические болезни) и неспецифических (хронические заболевания органов дыхания, заболевания глаз и кожи) пылевые поражения.

## 2) повышенный уровень шума на рабочем месте:

Под шумом в производственной санитарии понимают упругие колебания в частотном диапазоне слышимости человека, распространяющиеся в виде волны в газообразных средах.

Для постоянных рабочих мест и рабочих зон допустимый уровень шума 85 дБ. Для нормирования шума используют ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Допустимые уровни шума на рабочих местах в производственных помещениях отражены в таблице 18.[4]:

Таблица 18 – Допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Производственное помещение	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

## 3) повышенный уровень вибрации:

Вибрации при работе мостового крана возникают как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. По способу передачи вибрации являются локальными. А по временным характеристикам, временная. Допустимый уровень вибрации представлен в таблице 2. Вертикальные колебания кранового моста имеют диапазон частот-1,5–8,0 Гц. Горизонтальные колебания, которые передаются кабине управления в результате раскачивания груза, – диапазон частот 0,2–1,0 Гц. Учитывая, что резонансная частота колебаний органов человеческого тела находится в диапазоне частот 1 – 15 Гц,

машинист подвергается вертикальным колебаниям наиболее неблагоприятного спектра.

Таблица 19.– Допустимый уровень вибрации

<i>Вид вибрации</i>	<i>Допустимый уровень виброскорости, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц</i>										
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Общая транспортная:											
вертикальная	132	123	114	108	107	107	107	—	—	—	—
горизонтальная	122	117	116	116	116	116	116	—	—	—	—

#### 4) отклонение показателей микроклимата:

Во многих случаях наличие вредных факторов способствует проявлению опасных факторов. Например, чрезмерная влажность повышает опасность поражения человека электрическим током.

В соответствии с санитарно-эпидемиологические правилами и нормами СанПиН 2.2.4.548-96 определены показатели, характеризующие микроклимат в производственных помещениях [2]:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Человек будет чувствовать себя абсолютно комфортно, если влажность окружающего его воздуха будет колебаться в пределах от 40 до 60%. В случаях снижения влажности ниже 40%, практически все здоровые люди начинают испытывать сонливость, рассеянность, ощущать чувство сухости кожи и раздражение слизистых оболочек.

Для данной категории работ микроклимат производственного помещения характеризуется следующими показателями:

- температура воздуха  $15^{\circ} \div 21^{\circ} \text{C}$  - холодный период года,  $16^{\circ} \div 27^{\circ} \text{C}$  - в теплый период года;
- влажность воздуха  $40 \div 60 \%$ ;
- скорость движения воздуха  $0,2 \div 0,3 \text{ м/с}$  [3].

Система вентиляции - механическая, приточно-вытяжная. Она обеспечивает выполнение данных требований.

Система отопления электрическая: на стенах установлены электрические печи, работающие в системе с тепловым реле.

Площадь помещения удовлетворяет требованиям, то есть более  $4,5 \text{ м}^2$  на одного человека.

Неблагоприятные условия окружающей среды вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию. К таким условиям относятся:

- неблагоприятный микроклимат;
- производственные пыли;
- вредные газы и пары;

Для обеспечения санитарно — гигиенических условий на рабочем месте и обеспечения требований нормативных документов к выявленным вредным факторам, предусмотрены такие технические устройства, как вентиляция помещения с фильтрацией воздуха, системы отопления и освещения, изоляции токопроводящих полов.

Таким образом можно сделать вывод что условия труда машиниста крана соответствует кл. 3.1; 3.2.

Звукоизоляция стен снижает уровень шума при работе электроприводов крана, изоляция токопроводящих полов резиновыми диэлектрическими ковриками обеспечивает защиту от поражения электрическим током, а также применяются в случае необходимости диэлектрические перчатки, например: при измерении сопротивления изоляции.

Работы выполняются в спецодежде. Для верхней тёплой одежды в кабине предусмотрено гардеробное оборудование.

При разработке технологических процессов, а так же при организации рабочего места следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека на рабочих местах до значений не превышающих допустимые:

- разработкой шумобезопасной техники;
- применением средств защиты (индивидуальной или групповой).

При выполнении работ по реконструкции крана уровни шума и вибрации незначительны и удовлетворяют требованиям стандартов.

#### **4.2.2 Анализ опасных факторов, связанных с эксплуатацией крана**

***К опасным факторам относятся:***

- 1) механические виды опасности, связанные с подъемными операциями;
- 2) механические виды опасности, связанные с составными частями, грузозахватными устройствами, с грузами;
- 3) электрические виды опасности;
- 4) опасность, вызванная неожиданным пуском, неожиданным превышением скорости и тому подобное;
- 5) опасность, вызванная ошибками (дефектами) во время составления или монтажа крана;
- 7) опасность, вызванная падением предметов (инструмента, деталей крана, вещей обслуживающего и ремонтного персонала и тому подобное);
- 8) опасность, вызванная поступательным движением крана;

### **4.2.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов**

#### **1) повышенная запыленность воздуха рабочей зоны:**

В рассматриваемом производстве борьба с пылью ведётся с помощью промышленного пылесоса, так как технологический процесс требует ликвидации пыли. К индивидуальным средствам защиты относятся противопылевые респираторы, защитные очки, специальная противопылевая одежда. Производственный процесс относится к 1а группе (избытки явного тепла незначительны, отсутствуют значительные выделения влаги, пыли, особо загрязняющих веществ)[15]

#### **2) повышенный уровень шума на рабочем месте:**

При превышении уровня шума в рабочей зоне от 80 дБА, наниматель должен провести оценку риска здоровью персонала и подтвердить приемлемый риск здоровью[20].

Если эквивалентный уровень шума – от 85 дБА, то работать нельзя [20]. Все оборудование, применяемое на участке обработки, для снижения шума установлено на виброопорах. Для защиты органов слуха применяют: наушники, антифоны, беруши.

#### **3) повышенный уровень вибрации:**

Снижение неблагоприятного воздействия вибрации ручных механизированных устройств на операторов достигается как путем уменьшения интенсивности вибрации непосредственно в ее источнике (за счет конструктивных усовершенствований), так и средствами внешней виброзащиты, которые представляют собой упругодемпфирующие материалы и устройства, размещенные между источником вибрации и руками оператора.

В качестве средств индивидуальной защиты работающих используют специальную обувь на массивной резиновой подошве. Для защиты рук служат рукавицы, перчатки, вкладыши и прокладки, которые изготовляют из упругодемпфирующих материалов.

#### **4) отклонение показателей микроклимата:**

Работникам, работающим в холодное время года на открытом воздухе или в закрытых необогреваемых помещениях, а также грузчикам, занятым на погрузочно-разгрузочных работах, и другим работникам в необходимых случаях предоставляются специальные перерывы для обогрева и отдыха, которые включаются в рабочее время. Работодатель обязан обеспечить оборудование помещений для обогрева и отдыха работников

В качестве средств индивидуальной защиты при работе на открытом воздухе в сильные морозы применяется: теплая спецодежда, утепленные прорезиненные рукавицы, валенки на резиновом ходу, шапка - ушанка. В пасмурную дождливую погоду используются резиновые плащи и сапоги, а также резиновые верхонки.

#### **5) Движущиеся машины и механизмы:**

Сигнализация является средством, позволяющим работникам ориентироваться в случае аварийной ситуации и принять необходимые меры предосторожности. На кранах обычно применяют звуковую сигнализацию, срабатывающую при сильном ветре. Средствами защиты от травмоопасных и вредных производственных факторов на козловом кране являются приборы и устройства безопасности: ограничители грузоподъёмности – осуществляют ограничение грузоподъёмности при помощи конечных выключателей типа ВК-300А, установленных на ограничителях, ограничители крайнего верхнего положения траверсы – осуществляют два конечных выключателя типа ВУ-250М или четыре ВПК-1110, соединёнными с валами грузовых лебёдок; ограничитель концов рабочего участка рельсового пути при передвижении перегружчика – осуществляет ограничение пути крана конечным выключателем типа КУ-701; блокировка двери кабины – препятствует включению перегружчика в работу при открытой двери кабины, осуществляется конечным выключателем ВПК-1110;

## **6) Повышенное значение напряжения в электрической цепи:**

Анализ электротравматизма показывает, что большинство несчастных случаев с работниками, обслуживающими электроустановки, происходит в результате потери им ориентировки при осмотрах, ремонтах и испытании. Электрические блокировки являются наиболее надёжным средством защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Они препятствуют доступу работающих к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением. Ограничители так же, как электрические блокировки, служат для защиты людей и оборудования при неправильных действиях в процессе работы.

## **7) Пожар:**

Согласно СП 12.13130-2009 рабочее место мостового крана по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории “Г” т.е умеренная пожароопасность [5].

Основными источниками являются сварочные полуавтоматы и электроустановки.

Все электроустановки должны быть защищены аппаратами защиты от токов КЗ и других аварийных режимов, которые могут привести к пожарам и загораниям.

При эксплуатации электроустановок запрещается:

- использовать электродвигатели и другое электрооборудование, поверхности которого при работе нагреваются более чем на 40° С по сравнению с температурой окружающего воздуха;
- использовать кабели и провода с поврежденной изоляцией и изоляцией, которая в процессе эксплуатации потеряла необходимые электроизоляционные свойства (например, сопротивление изоляции каждого участка в электросетях до 1000 В должно быть не ниже 0,5 МОм на фазу);
- оставлять под напряжением электрические провода и кабели с неизолированными концами:

- пользоваться поврежденными розетками, соединительными коробками, рубильниками и другими электроустановочными изделиями.

Большое значение и профилактике аварийных режимов в электроустановках имеет правильный выбор аппаратов защиты. Так, защита от перегрузок с помощью предохранителей возможна при условии, если защищаемые элементы установки будут иметь запас по пропускной способности на 25 % больше номинального тока плавких вставок.

При эксплуатации машин и оборудования с электроприводами и электросетей запрещается: использовать электрические кабели с поврежденной изоляцией и плохим контактом в местах соединения; допускать соприкосновение электрических проводов как между собой, так и с металлоконструкциями; применять некалиброванные плавкие вставки и различные предохранители собственного изготовления; оставлять без присмотра включенными в электросеть нагревательные приборы; применять для отопления и сушки самодельные электронагревательные приборы.

Кроме указанных требований, специфичных для эксплуатации электроустановок, всему персоналу следует соблюдать общие правила пожарной безопасности, в том числе режимного характера (курение в строго установленных местах, соблюдения правил пользования открытым огнем при ремонтных работах, сварке, пайке и т. п.). Выполнение этих требований позволяет сократить число пожаров на объектах. Вместе с тем следует учитывать, что профилактика пожаров не может полностью гарантировать от возможности их возникновения. В этом случае наряду с правильными действиями по тушению пожара важное значение приобретает своевременное его обнаружение, что достигается применением автоматической пожарной сигнализации.

#### **4.3. Экологическая безопасность.**

В процессе эксплуатации крана возможно загрязнение окружающей среды смазочными материалами.

Для того чтобы исключить или минимизировать вред, требуется, во-первых, проводить своевременные регламентные работы по техническому обслуживанию и ремонту кранов.

Во-вторых, оперативно, квалифицированно и своевременно ликвидировать источники загрязнения при их возникновении.

Что касается электроприводов, то они рассчитаны на длительный срок службы, по истечении которого должны быть утилизированы.

Утилизируемые электроприводы демонтируются, разбираются и сортируются по различным материалам: отходы электронных деталей, черные и цветные металлы, смазочные материалы.

При утилизации должны соблюдаться следующие правила:

-отсортированные материалы устраниются через упорядоченную систему утилизации, с соблюдением местных правил;

-при утилизации должны быть выдержаны нормы охраны окружающей среды;

-смазочные материалы представляют опасность загрязнения водных ресурсов, поэтому не должны попасть в окружающую среду.

#### **4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В данном технологическом процессе может возникнуть пожар из-за короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к воспламенению изоляционного материала.

На рабочем месте каждый электропривод оборудования должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок. Установлены системы предотвращения пожара и противопожарной защиты.

1. Защита электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок;

Защита электрооборудования и электрических сетей от токов короткого замыкания и значительных по величине и продолжительных перегрузок осуществляется предохранителями с плавкими вставками и автоматическими

выключателями. При выборе аппаратов защиты должны быть соблюдены следующие условия:

– номинальное напряжение предохранителя должно быть равно или больше номинального напряжения сети

– плавкая вставка предохранителя не должна плавиться при расчетном токе

– плавкая вставка не должна расплавляться при пиковых токах

## 2. Воспламенения изоляции в следствии повышения температуры

С физической точки зрения, источниками загорания, проявляющимися при описанных аварийных электрических режимах, являются:

а) сильное тепловыделение при прохождении тока. Это может происходить по причине несоответствия величины протекающего тока и сечения проводника – либо за счет того, что ток слишком велик для данного штатного проводника (перегрузка) или микроканала, по которому проходит ток утечки, нагрев при не полном коротком замыкании;

б) искры, возникающие при больших переходных сопротивлениях, а также работе коммутационных устройств другого искрящего «электрооборудования»;

в) макродуги, возникающие при коротком замыкании;

г) раскаленные частицы и капли расплавленного металла, образующиеся при коротком замыкании;

При анализе версий обычно учитывают, что источники зажигания как правило проявляют себя не поодиночке, а в комплексе. И при коротком замыкании, и при перегрузке, и больших переходных сопротивлениях часто имеет место сочетание последовательно или параллельно протекающих физических процессов и в каждом из них в ходе развития может проявиться несколько указанных факторов:

- при металлическом коротком замыкании – электрическая дуга с присущими «опасными факторами», но, плюс к этому, может проявиться и

перегрузка за счет прохождения по электрической цепи тока короткого замыкания.

- при неметаллическом коротком замыкании – утечка тока, нагрев изоляции, и ее карбонизация, разложение (если она представляет собой органический материал), но, в конечном счете, дело может закончиться пробоем и электрической дугой, опять же, с присущими ей «опасными факторами» и характерными следами (дуговыми оплавлениями).

- при перегрузке – нагрев проводников на протяженном участке и более сильный – в локальных зонах БПС. Если последние присутствуют в электрической цепи, то горение при перегрузке, скорее всего, возникнет в зоне их нахождения, если там имеются соответствующие горючие материалы. Если нет, то изоляция перегруженного провода может загореться в любом другом месте. Закончиться же все может, как и в предыдущих случаях, электрической дугой и дуговыми оплавлениями.

## Заключение

В ходе выполнения работы был выполнен обзор современного электропривода мостовых кранов и выявлены проблемы, которые присутствуют в крановом электроприводе.

В данной работе был рассмотрен и рассчитан частотно-регулируемый электропривод переменного тока. ЭП питается от 3х – фазной промышленной сети переменного тока с линейным напряжением 380 В частотой 50 Гц.

Произведен расчет системы управления электроприводами механизма.

С помощью имитационной модели, собранной в приложении Simulink программы MATLAB, была представлена работа мостового .

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнен технический проект и решены следующие задачи:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность производства участка путем улучшения энергоэффективности, энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат при эксплуатации.

В разделе «Социальная ответственность» проекта освещены вопросы: производственной безопасности; экологической безопасности; рассмотрены вероятные чрезвычайные ситуации при работе мостового крана.

## Conclusion

In the course of the work, a review of the modern electric drive of bridge cranes was carried out and the problems that are present in the crane drive were identified.

In this paper, the frequency-controlled AC drive was considered and calculated. The EP is powered by a 3-phase industrial AC network with a linear voltage of 380 V and a frequency of 50 Hz.

The calculation of the control system of the electric drive mechanism.

With the help of a simulation model compiled in the MATLAB Simulink application, the work of the bridge was presented.

In the section “Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving”, a technical project was completed and the following tasks were solved:

- as a result of the SWOT analysis, the strengths and weaknesses of the choice of technical design were identified. It has been established that a technical project has several important advantages, which provide an increase in productivity, safety, and profitability of technical production.

- when planning technical works, a schedule of employment for two performers was developed, a Gantt tape chart was drawn up, which allows to optimally coordinate the work of the contractor.

- drawing up an estimate of the technical project made it possible to estimate the initial amount of expenses for the implementation of the technical project.

- assessment of the project resource efficiency, carried out by the integral indicator, gave a high result (4.6 on a 5-point scale), which indicates the effectiveness of the technical project implementation.

The implementation of this technical project allows to increase the production efficiency of the site by improving energy efficiency, energy saving when introducing more versatile equipment that requires less cost to operate.

The “Social Responsibility” section of the project highlights the issues of: industrial safety; environmental safety; probable emergencies during the operation of a bridge crane are considered.

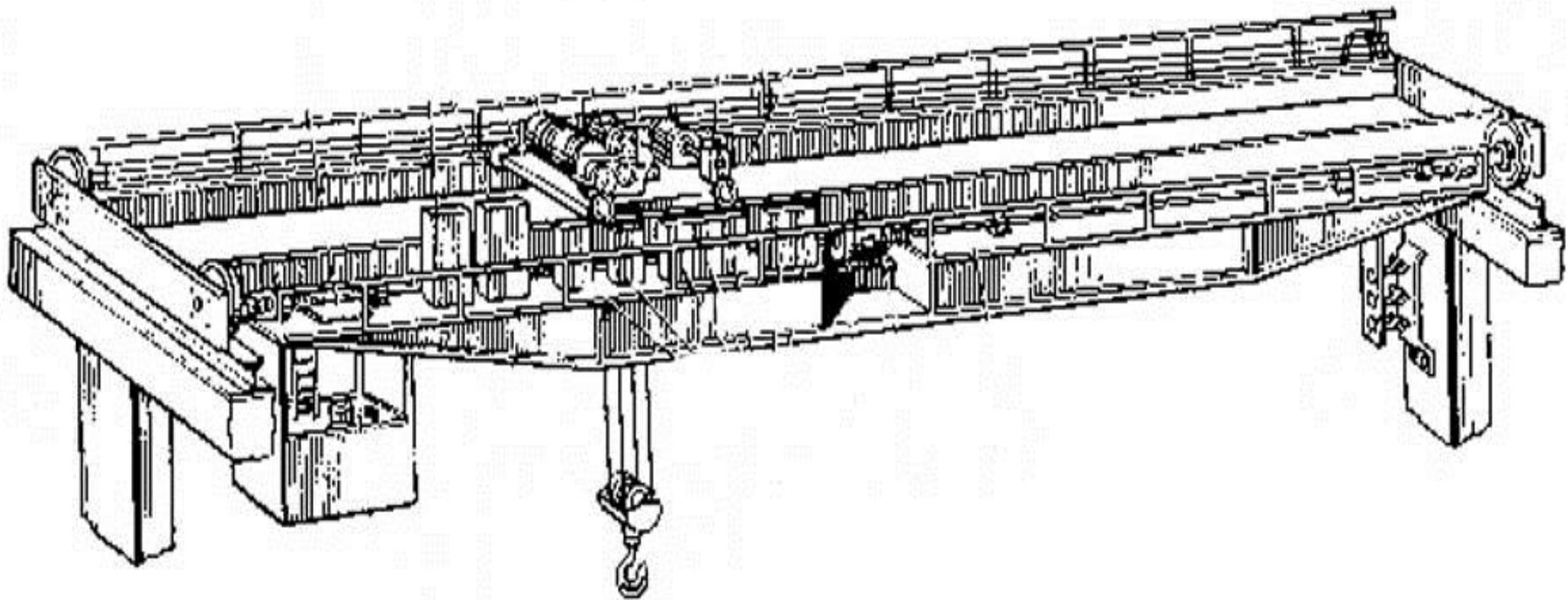
### Список использованных источников

1. Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
2. А. Б. Парницкий. Мостовые краны общего назначения: Конструкция, расчет, эксплуатация / А. Б. Парницкий, А. П. Шабашов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Машгиз. [Урало-Сиб. отд-ние], 1961. – 319 с., 2 л. черт. : ил.
3. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382-00). М.: ПИО ОБТ, 2000. – 268 с.
4. Шишков Н.А. Надежность и безопасность грузоподъемных машин. – М.: Недра, 1990. – 252 с.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382-00). – М.: ПИО ОБТ, 2000. – 268 с.
6. Продажа кранового оборудования, его обслуживание, монтаж, реконструкция и модернизация [Электронный ресурс]. – URL: <http://dvesta.com> – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.02.2014)
7. Гохберг М.М. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций/ В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.: ил.
8. Кацман М.М., Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
9. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие/ А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
10. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 8. – Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: Учебное пособие. – Томск: Изд-во. ТПУ, 2010. – 448 с.

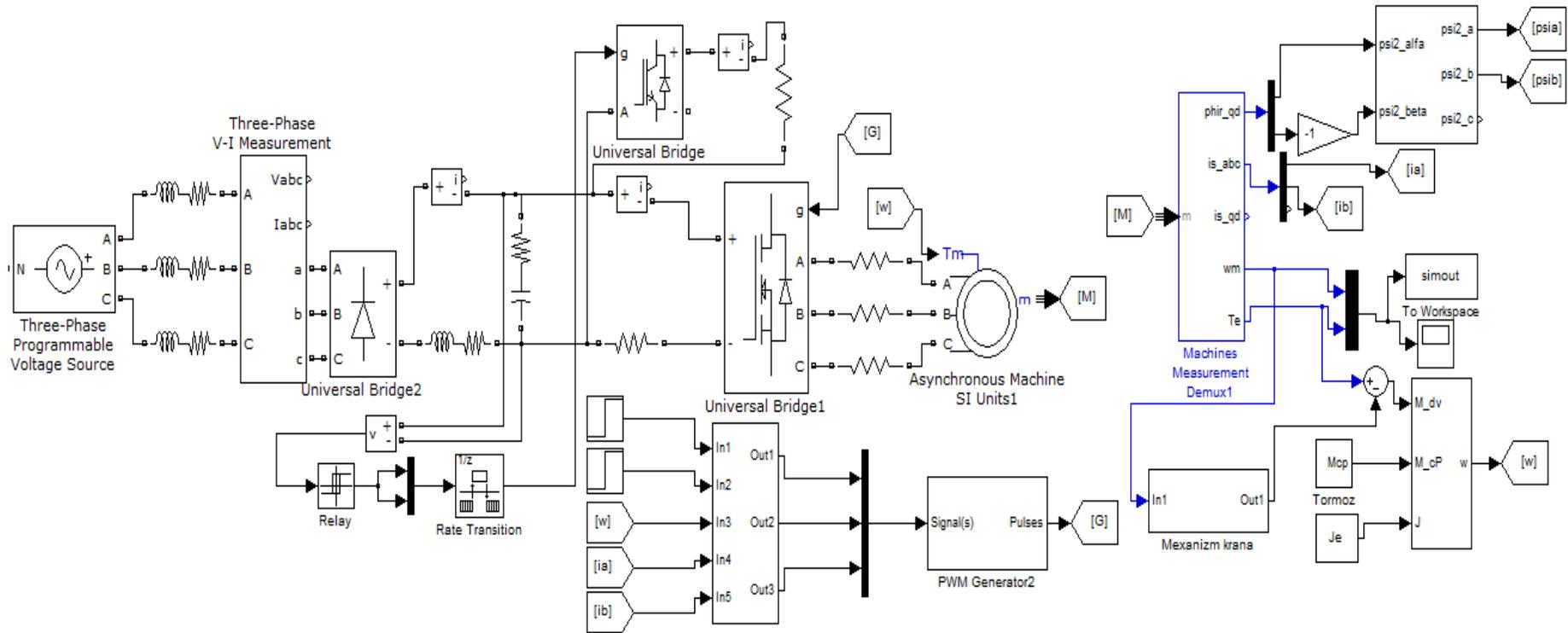
11. Ермоленко В.А. Расчет механизма подъема груза мостового крана – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 32 с.
12. Волкова Л. Методика проведения SWOT-анализа // [http://market.narod.ru/S\\_StrAn/SWOT.html](http://market.narod.ru/S_StrAn/SWOT.html).
13. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие // И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницина; Томский политехнический университет.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014.-36с
14. Криницина З.В., И.Г. Видяев Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие – Томск, издательство Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.
15. ГОСТ 27584-88 Краны мостовые и козловые электрические.
16. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
17. ГОСТ 12.1.005-88 Межгосударственный стандарт . Система стандартов безопасности труда.
18. ГОСТ 12.1.003-83 Шум. Общие требования безопасности.
19. СП 13.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

**Приложение А**  
Графический материал

## Общий вид мостового крана



## Имитационная модель механизма подъема мостового крана



Диаграммы электромагнитного момента  $M_{эм}(t)$ , скорости вращения  $\omega(t)$  и фазного тока  $i_{\phi}(t)$  двигателя

