

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Асинхронный электропривод механизма передвижения козлового крана

УДК 621.873.135-83

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Исмаилов Анваржон Анарбай угли		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин В.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук И.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. зав. кафедрой-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
Р 1	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>
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
Р 4	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.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 6	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.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	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>
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	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:

И. о. зав. кафедрой

- руководителя ОЭЭ ИШЭ

_____ 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
3-5Г5А1	Исмаилову Анваржону Анарбай угли

Тема работы:

Асинхронный электропривод механизма передвижения козлового крана

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№58-27/с от 27.02.2020г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

29.05.2020г.

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.)

- Двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана;
- Нагрузка – реактивная;
- Режим работы – повторно-кратковременный;
- Обеспечение синхронизации скоростей вращения двух приводов при изменении нагрузки.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<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>	- Изучить технологический процесс; - Выбрать преобразователь частоты и двигатель; - Рассчитать статические характеристики электродвигателей; - Разработать имитационную модель электропривода; - Исследовать возможности синхронизации скоростей двух приводов.
Перечень графического материала:	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы:	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.03.2020г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин В.В.	к.т.н.		20.03.2020г..

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Исмаилов Анваржон Анарбай угли		20.03.2020г..

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

Инженерная школа энергетике

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения весенний семестр 2019 /2020 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:	29.05.2020г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.05.2020	Основная часть	60
15.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.2020	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель

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

СОГЛАСОВАНО:

И. о. зав. кафедрой-руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 114 листов, 29 рисунка, 16 таблицы, 41 источник, приложение.

Ключевые слова: двухдвигательный электропривод, частотно-регулируемый, электропривод, кран козловой, управление векторное, выравнивание нагрузки.

Актуальность работы: Механизм передвижения крана козлового должен обеспечить синхронное вращение двух электроприводов даже при изменении нагрузки для него нужно разработать модель двухдвигательного электропривода

Объектом исследования является электропривод двухдвигательный механизма козлового крана его передвижения.

Задачи и цели работы состоят в исследовании и разработке двухдвигательной системы управления с частотными преобразователями и с датчиками по связям обратным, обеспечивающей вращение согласованное, при котором будет реализовываться движение равномерное опор крана козлового.

Работа состоит из пяти разделов, так же введение, и заключение, представлен список использованных источников.

В процессе работы провели исследования электропривода двухдвигательного частотно-регулируемого.

По результатам исследования была обоснована адекватность имитационных моделей, так же получены параметры настройки данной системы которая обеспечивает синхронизации скоростей при работе вращения двух приводов и при изменении нагрузки.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word. Так же были использованы: среда имитационного моделирования – Matlab, система компьютерной алгебры – MathCad .

Оглавление

Введение	9
1 Технологический процесс	11
1.1 Назначение и технические характеристики козлового крана ЛТ-62	11
1.2 Кинематические особенности козловых кранов	16
1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу механизма горизонтального передвижения	18
1.4 Обзор существующих систем управления электроприводами механизмов передвижения козловых кранов	20
1.5 Особенности двухдвигательного электропривода	23
2 Выбор оборудования и расчет электропривода механизма передвижения козлового крана	25
2.1 Выбор двигателя	25
2.2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя	32
2.3 Выбор преобразователя частоты	36
2.4 Расчет естественных характеристик электропривода	39
2.5 Расчет статических характеристик двигателя и элементов силового канала и нагрузки электропривода при частотном векторном управлении	42
2.6 Параметры, структурные схемы и модели системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель	44
3 Оптимизация контуров регулирования	47
3.1 Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором	47
3.1.1 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором	48
3.2 Оптимизация контура потокосцепления с ПИ-регулятором	49
3.2.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором	51
3.3 Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором	52
3.3.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором	53
4 Разработка имитационной модели электропривода	55
4.1 Математическая модель асинхронного двигателя	55
4.2 Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана	58
4.3 Проверка адекватности разработанной модели асинхронного двигателя	60
4.4 Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	61
4.4.1 Скалярное управление	62
4.4.2 Векторное управление с обратной связью по скорости одного двигателя	64
4.4.3 Векторное управление с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя	67
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	71

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	72
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	73
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений	73
5.1.2 SWOT анализ	74
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	75
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	75
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	77
5.2.3 Бюджет научно-технического исследования	80
5.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	80
5.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	81
5.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	83
5.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	85
5.2.3.5 Накладные расходы	85
5.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	87
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	91
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	92
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	93
6.2 Производственная безопасность	95
6.2.1 Анализ вредных производственных факторов	97
6.2.2 Повышенный уровень вибрации на рабочем месте	98
6.2.3 Отклонения параметров климата на открытом воздухе	98
6.2.4 Превышение уровня электромагнитных излучений	100
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	106
Заключение	108
Conclusion	109
Список используемой литературы	110
Приложение А	115

Введение

Подъемно-транспортные механизмы, представляют собой большую группу механизмов общепромышленного назначения, выполняющих разнообразные погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся краны - мостовые, козловые, башенные, поворотные и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают козловые краны.

Козловые краны оснащены системами двухдвигательного электропривода. В их числе привода, обеспечивающие горизонтальное передвижение самого крана. Таковыми являются механизмы передвижения.

Привода устанавливаются у основания стоек, представляющих собой несущую часть крана. Основным требованием к данному механизму является согласованное передвижение опор козлового крана при одинаковой скорости вращения электроприводов. Поэтому, на основе данного требования, необходимо применение специальной системы согласования приводов. Механизмы передвижения являются единственными, где необходима система согласования или синхронизации. [1, 2, 3]

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выбрать электродвигатель и преобразователь частоты, рассчитать параметры схемы замещения и получить механические и электромеханические характеристики электродвигателя.

2. Разработать модель в программной среде Simulink Matlab, позволяющую имитировать двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, включая два преобразователя частоты, два двигателя, реактивную нагрузку, контура обратных связей.

3. Провести исследования имитационной модели двухдвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода в различных режимах работы: различной нагрузке и задании скорости. Подобрать

коэффициенты для компенсаций момента и скольжения для выравнивания нагрузки для двигателей с различными параметрами.

4. Произвести расчет и анализ технико-экономических показателей, рассчитать годовой экономический эффект.

5. Определить и проанализировать опасные и вредные факторы сред. Рассмотреть негативные воздействия на окружающую среду, чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации электропривода козлового крана.

1 Технологический процесс

1.1 Назначение и технические характеристики козлового крана ЛТ-62

В данное время, козловые краны являются одним из основных средств механизации перегрузочных и складских работ в различных отраслях народного хозяйства. Козловые краны относят к кранам мостового типа, входящих в группу подъемно-транспортных машин, отличающихся кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы электроприводов.

По назначению козловые краны делятся на три основные группы: общего назначения (перегрузочные), строительно-монтажные и специального назначения.

Козловые краны используют для обслуживания открытых складов и погрузочных площадок, монтажа сборных строительных сооружений и оборудования, промышленных предприятия, обслуживания гидротехнических сооружений и выполнения погрузочно-разгрузочных работ на контейнерных площадках железнодорожных станций с температурой рабочей среды от -40 до + 40 градусов; грузоподъемность их, как правило, 3,2...50 т.; пролеты 10...40 м; высота подъема груза в зависимости от условий загрузки-разгрузки транспортных средств или штабелирования грузов 7..16 м. [5, 6]

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62.

Козловой кран ЛТ-62 (рисунок 1) получил широкое применение на нижних лесных складах на разгрузке хлыстов с лесовозного транспорта и создании запасов. [5, 6]

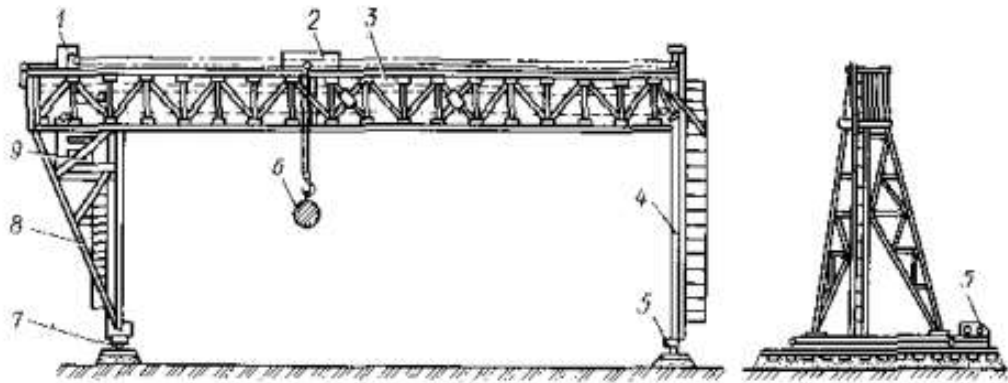


Рисунок 1 – Козловой кран ЛТ-62

Несущая ферма 3 козловых кранов расположена на высоких опорах – жесткой 8 и шарнирной 4, ноги которых опираются на ходовые тележки 5 и 7, передвигающиеся по крановым путям. Шарнирность присоединения верхнего конца опоры 4 к несущей ферме компенсирует забегание одной опоры по отношению к другой, а также некоторые неточности в прокладке пути. Грузовая тележка 2 при помощи лебедки 1 передвигается вдоль несущей фермы. У большинства подобных кранов для подъема и опускания груза служат две лебедки, расположенные по концам несущей фермы. Кабина крановщика 9 располагается в верхней части жесткой опоры.

Груз 6 можно перемещать по трем направлениям: по вертикали – при работе грузоподъемного механизма; в пределах пролета (расстояние между опорами) крана – при движении грузовой тележки и вдоль подкрановых путей – при передвижении крана. Штабеля размещают в пролете крана.

Вдоль несущей фермы прокладывают пути для перемещения грузовой тележки; пути располагают либо поверх несущей фермы, либо под ней. В первом случае путь является рельсовым, во втором путепроводом служит двутавровая балка, которая крепится к нижнему поясу фермы.

Механизм подъема и опускания груза у козловых кранов состоит из грузовой лебедки и канатоблочной системы, включающей полиспаст с крюковой обоймой. Грузовая лебедка размещается по двум вариантам: непосредственно на грузовой тележке или на несущей ферме. У некоторых

моделей козловых кранов большой грузоподъемности устанавливают две грузовые лебедки, располагаемые по концам несущей фермы.

Схема запасовки канатов грузоподъемного механизма, имеющего две грузовые лебедки, состоит из двух одинаковых канатоблочных систем с приводом от однобарабанных лебедок.

Грузовая тележка представляет собой раму, имеющую ходовые колеса. На тележке расположены неподвижные блоки полиспаста и у некоторых моделей кранов грузовая лебедка. В зависимости от расположения пути грузовой тележки (поверх несущей фермы или под ней) она или опирается на ходовые колеса, или подвешивается к ним. В первом случае тележка имеет два полиспаста, ветви которых свешиваются по обе стороны несущей фермы.

Для передвижения грузовой тележки служит однобарабанная реверсивная лебедка, устанавливаемая в конце несущей фермы, обычно над жесткой опорой. На барабане лебедки закреплены концы обеих ветвей тягового каната. Одна ветвь закреплена с одной стороны грузовой тележки, вторая – огибает направляющий блок и крепится к тележке, с другой стороны. Благодаря тому, что направление навивки на барабан ветвей тягового каната различно, одна из ветвей при включении барабана наматывается, а другая – разматывается, в результате чего грузовая тележка перемещается по несущей ферме. Изменить направление движения тележки можно путем реверсирования электродвигателя лебедки. Для точной остановки грузовой тележки тяговая лебедка оборудована электромагнитным тормозом. По концам пути тележки установлены тупиковые упоры. На грузовой тележке мостовых кранов размещены механизмы подъема груза и передвижения тележки, имеющие индивидуальные приводы. Оба механизма оборудованы колодочными тормозами и конечными выключателями, ограничивающими высоту подъема груза и ход тележки.

Механизм передвижения служит для горизонтального перемещения моста или всего крана. Козловые краны передвигаются по двум рельсам, опираясь на них четырьмя ходовыми тележками. На каждом рельсе (под одной опорой) располагается по две тележки (ведущая и ведомая). Ведущая тележка состоит из рамы, на которой размещены привод, ходовые колеса и противоугонный захват. Привод тележки состоит из электродвигателя, редуктора и расположенного между ними электромагнитного тормоза. На одной из ведущих тележек имеется конечный выключатель, ограничивающий передвижение крана. Противоугонный захват клещевого типа связывает тележку с рельсом в тех случаях, когда возникает опасность самопередвижения крана под действием ветровой нагрузки. К опоре крепятся нога крана.

Управление механизмами крана сосредоточено в кабине крановщика. Ее расположение должно обеспечить благоприятные условия для наблюдения за процессом работы. У козловых и некоторых моделей консольно-козловых кранов кабина расположена в верхней части жесткой опоры. Консольно-козловые краны чаще оборудованы передвижной кабиной, которая связана тягой с грузовой тележкой и передвигается вместе с ней по ездовой балке.

Для предупреждения аварий в системе управления крана имеется ряд блокировок, автоматически ограничивающих высоту подъема грузовой траверсы, а также выход грузовой тележки и самого крана за пределы рабочих участков. Блокировка двери кабины крановщика не допускает включения механизмов крана, если дверь кабины открыта. Козловые краны оборудованы устройством, регистрирующим ветровую нагрузку на конструкцию крана.

При ветре, сила которого становится опасной, т.к. может вызвать самопередвижение крана, включаются световой и звуковой сигналы. При этом работа на кране должна быть прекращена и включены противоугонные захваты.

Подача электроэнергии к козловым кранам обычно осуществляется по гибкому четырехжильному кабелю. Многие модели кранов оборудуются кабельным барабаном, механизмирующим наматывание и разматывание электрического кабеля при передвижении крана.

Электродвигатели козловых кранов получают питание от троллейных проводов, проложенных вдоль эстакады. Электроэнергия, поступающая к двигателям грузовой тележки, снимается с троллейных проводов, протянутых вдоль моста.

Козловые краны, у которых концы несущей фермы выступают за опоры в виде консолей, называются консольно-козловыми. У таких кранов штабеля можно дополнительно размещать под консолями, что увеличивает площадь, занятую штабелями, и позволяет при той же протяженности крановых путей создавать большой запас лесоматериалов. [5, 6]

Основные параметры и характеристики приведены в таблице 1. [5, 6]

Таблица 1 - Основные параметры и характеристики крана ЛТ-62

Наименование показателей	Норма
Грузоподъёмность номинальная, т	32
Наибольшая высота подъёма груза, м	11,8
Скорость подъёма груза, м/мин	$13,4 \pm 1,0$
Скорость передвижения тележки, м/мин	$32,6 \pm 1,0$
Скорость плавной посадки груза, м/мин	$12,0 \pm 1,0$
Скорость передвижения перегрузчика, м/мин	$51,0 \pm 2,0$
Установленная мощность, кВт, не более	129
Режим работы двигателей, ПВ %	средний 25
Длина пролёта, м:	40 – 0,04
Масса конструктивная, т	95,6

Технические данные канатов, установленных на перегрузчике, приведены в таблицу 2. [5, 6]

Таблица 2 - Технические данные канатов, установленных на перегрузчике

Наименование	Диаметр, мм	Длина пролёта 40 м	Обозначение
Канат грузовой (2 конца)	21,5	203	21,5-Г-В-Н-180 ГОСТ 3079-69
Тяговой канат передвижения тележки	15,0	126	15-Г-1-Н-170 ГОСТ 3081-69

Технические данные лебёдки грузовой, приведены в таблице 3. [5, 6]

Таблица 3 - Технические данные лебёдки грузовой

Наименование показателей	Норма
Тяговое усилие номинальное	Н – 3899
Тяговое усилие максимальное	Н – 4506
Диаметр каната	мм – 21,5
Диаметр барабана	мм – 571,5
Передаточное число редуктора	У2У-400Н-25-22М – 25

Технические данные механизма передвижения перегрузчика, представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические данные механизма передвижения

Наименование показателей	Норма
Передаточное число редуктора	У2У-200-12,5-22 – 12,5
Передаточное число открытой зубчатой зубной пары	2,82
Общее передаточное число	35,4
Диаметр ходового колеса	мм – 600

1.2 Кинематические особенности козловых кранов

В механизмах передвижения кранов наибольшее распространение получил многодвигательный привод, при котором каждая концевая балка моста приводится в движение своим самостоятельным приводом, причем между приводами, расположенными на различных концевых балках, существуют связь, осуществляемой с помощью внешней системы согласования, кроме самой металлоконструкции. В результате обеспечивается одна функция – передвижения крана по рельсам. [1, 2, 3]

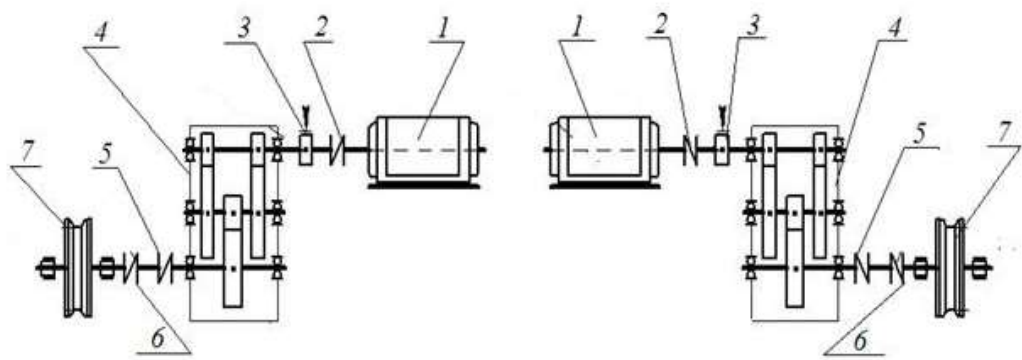


Рисунок 2 - Кинематическая схема механизма передвижения крана

Конструктивно механизмы передвижения выполняют в виде скрепляемых с основанием стоек опор одноколесных или балансирных тележек и, реже, ходовых балок, на которые попарно опираются две стойки. На рисунке 2 имеются два согласованно работающих механизма передвижения козлового крана. Каждый механизм включает в себя электродвигатель 1, соединенный муфтой 2 с редуктором 4, передает движения на ведущие колеса 7. Вал приводного колеса соединен с тихоходным валом редуктора промежуточным валом 6 и зубчатыми муфтами 5. На полумуфте быстроходного вала редуктора установлен тормоз 3.

Преимущества индивидуального привода заключаются в компактности всего механизма передвижения, меньших маховых моментах электродвигателей, в сокращении времени пуска.

В механизмах передвижения в качестве электроприводов используются электродвигатели постоянного тока и переменного тока. Но с усовершенствованием электроприводов, применение двигателей на постоянном токе осталось позади. Сегодня широкое распространение получили асинхронные электродвигатели с фазным и короткозамкнутым роторами.

Применяемые электродвигатели рассчитывают для эксплуатации в повторно-кратковременном режиме, который характеризуется продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60% при продолжительности цикла не более 10 мин. Основным номинальным

режимом крановых двигателей переменного тока является ПВ=40%. Таким образом, выбору типов электроприводов способствуют режимы работы механизмов, а также параметрические требования грузоподъемности. [1, 2, 3]

1.3 Требования, предъявляемые к электроприводу механизма горизонтального передвижения

К механизмам горизонтального перемещения относят механизмы передвижения кранов и грузовых тележек, а также механизмы поворота. Все эти механизмы имеют реактивный (т.е. не зависящий от направления движения) момент нагрузки. [1, 7]

Идеальный электропривод механизма горизонтального перемещения должен обеспечивать жесткие механические характеристики (рисунок 3) в двигательном и тормозном режимах. В отличие от механизма подъема режим торможения механизмов горизонтального перемещения занимает лишь небольшое время цикла и возникает, как правило, при переходе с высших скоростей на низшие.

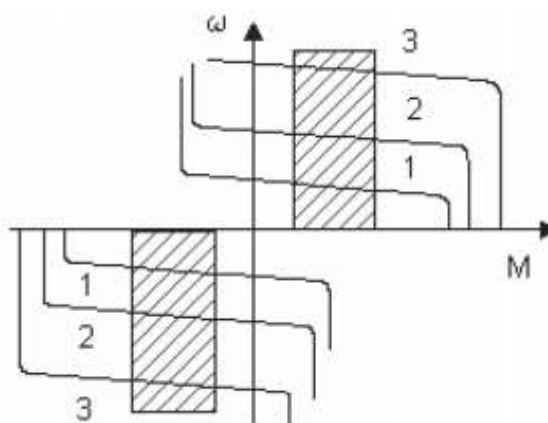


Рисунок 3 - Желаемые механические характеристики электропривода механизма горизонтального перемещения

В тормозном режиме электропривод механизмов горизонтального перемещения может работать также при движении под уклон (что бывает при неисправности рельсовых путей) или при движении по ветру.

Важнейшей особенностью механизмов передвижения и поворота является большая механическая инерция, влияние которой тем больше, чем тяжелее движущее сооружение и чем выше скорость движения, поэтому, во избежание повышенных динамических нагрузок на металлоконструкции и механизмы электропривод должен ограничивать ускорения при пуске и торможении. Приведенный к валу двигателя момент инерции движущихся масс установки для механизмов передвижения кранов в 2 - 20 раз больше собственного момента инерции двигателя. Поэтому для таких механизмов при большой частоте включений динамические нагрузки определяют необходимую мощность двигателя, а статические нагрузки невелики в сравнении с динамическими. [1, 7]

Масса перемещаемого груза, как правило, оказывает небольшое влияние на статический момент электропривода механизма передвижения, т.к. масса металлоконструкции крана обычно больше массы груза.

Алгоритм стопорения в электроприводах механизмов горизонтального перемещения проще, чем в электроприводах механизмов подъема. Из-за реактивного момента нагрузки снятие тормоза в большинстве случаев можно производить, не дожидаясь, пока момент электродвигателя возрастет до значения статического момента. Основным требованием является наложение тормоза при скорости, близкой к нулевой, для снижения динамических нагрузок и уменьшения износа тормозных накладок.

Однако эксплуатация козловых кранов под открытым небом, подвергается ветровой нагрузке, что в случае большой парусности может привести к значительному расширению пределов изменения статического момента сопротивления, при этом может измениться и знак момента. Ветровая нагрузка может иметь любое направление и при большой парусности пределы изменения статической нагрузки могут охватывать как двигательный, так и тормозной режимы. Диапазон регулирования скорости механизма, при заданной номинальной, определяется требуемой

пониженной скоростью. Наличие такой пониженной скорости, на которую переводится механизм перед остановкой, облегчает работу оператора, создает удобство управления и повышает точность остановки. [1, 7]

1.4 Обзор существующих систем управления электроприводами механизмов передвижения козловых кранов

В механизмах передвижения козловых кранов применение получили несколько видов систем управления: релейно-контакторные, дроссельные и частотно-регулируемые.

В данное время широко используемым типом электропривода для козловых кранов является электропривод на основе асинхронного двигателя с фазным ротором при реостатном управлении с помощью силовых контроллеров или простейших релейно-контакторных систем. Это связано с тем, что сроки службы кранов составляют десятки лет, а большинство кранов было выпущено в советское время. В данную систему также входит функция согласования механизмов передвижения. Использование релейно-контакторных систем управления, обусловлено условиями работы козловых кранов: троллейная система питания, высокое содержание электропроводящей пыли, влажность, загазованность, высокая температура и ее резкие колебания по длине пролета, высокая интенсивность работы крана, характеризующаяся большой продолжительностью и частотой включений. Однако, несмотря на ее широкое применение (путем электрического согласования роторов), она является неэффективной. [1]

Это связано со многими факторами. Во-первых, переключение ступеней пусковых сопротивлений в процессе разгона двигателя вызывает скачкообразные изменения его момента и броски токов в больших пределах, что усугубляется при снижении числа ступеней. Это может явиться причиной возникновения упругих механических колебаний и нарушить плавность протекания переходных процессов.

Во-вторых, при использовании систем многодвигательного электропривода для козловых кранов с относительно большим пролетом (25 метров) не одновременное замыкание контактов релейно-контакторной системы приводит к различным ускорениям каждого асинхронного двигателя с фазным ротором, что вызывает дополнительные динамические нагрузки в механизмах и металлоконструкции крана, и, в конечном счете, к снижению производительности и преждевременному выходу из строя элементов крана.

Наряду с релейно-контакторной системой в крановых механизмах используется дроссельная система. Она является более оптимальной в нерегулируемом электроприводе козлового крана. Использование пускового дросселя для ограничения тока ротора асинхронного двигателя в пусковых и тормозных режимах, обеспечивает плавность пуска и торможения механизмов при отсутствии системы управления ротором электродвигателя, сохраняя примерное постоянство момента до скорости 0,5-0,6 от синхронной. [1, 2]

Применение данной системы исключает из работы все активные сопротивления, релейно-контакторную схему управления и кабельную продукцию для подключения аппаратуры в цепь ротора, что до минимума упрощает схему электропривода механизма.

За счет обеспечения плавного разгона механизмов и особенно, плавного, но интенсивного торможения, резко увеличивается срок службы механических узлов (редукторов, муфт, валов, скатов, и т.д.). Полностью исключается "произвол" машиниста крана, т. к. выбранная при наладке интенсивность разгона и торможения механизмов остается неизменной. Но все же применение АД с ФР в настоящее время является неактуальным, что связано с дороговизной. [1, 2]

На основании вышеизложенного, для снижения динамических нагрузок и устойчивости работы механизма необходима оптимальная система регулирования электроприводами механизмов передвижения

козлового крана за счет модернизации существующих систем управления, либо за счет разработки новых систем. В результате должна повыситься долговечность и точность работы механизмов козлового крана с учетом всех предъявляемых к нему требований.

В настоящее время идет устойчивая тенденция перехода от нерегулируемых электроприводов козловых кранов, с релейно-контакторными, дроссельными системами, на регулируемые и эффективные по надежности электропривода. Это связано с активным применением в крановых механизмах преобразователей частоты с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями (АКЗ). [1, 2]

Частотное регулирование является наиболее эффективным способом регулирования скорости двигателя переменного тока, которое позволяет получить хорошие механические характеристики асинхронных двигателей.

Основными достоинствами этой системы регулируемого электропривода являются:

- плавность регулирования и высокая жесткость механических характеристик, что позволяет регулировать скорость в широком диапазоне;
- экономичность регулирования, определяемая тем, что двигатель работает с малыми величинами абсолютного скольжения, и потери в двигателе не превышают номинальных.

С применением частотно-регулируемых электроприводов в козловых кранах не разработаны математические модели двухдвигательного электропривода применительно к автоматизированному электроприводу механизма передвижения козлового крана при регулировании скоростей вращения двигателей с помощью полупроводниковых преобразователей по системе «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» (ПЧ-АД), не произведен анализ эффективности способа управления для частотно-регулируемого электропривода. [1, 2]

Особенностью электроприводов горизонтального перемещения является то, что большинство из них реализуются как многодвигательные приводы. В этом случае электродвигатели могут питаться как от одного преобразователя частоты, что является наиболее экономичным вариантом, так и от индивидуальных преобразователей, обеспечивающих более гибкое управление крановыми механизмами. [7]

Питание двигателей от индивидуальных преобразователей представляется целесообразным для приводов механизмов передвижения мостовых и козловых кранов с большими пролетами. В этом случае благодаря большей гибкости управления возможно обеспечение выравнивания нагрузки между двигателями по схеме «ведущий-ведомый» (рисунок 4), синхронизации движения приводов с целью устранения перекоса моста крана и т.д.

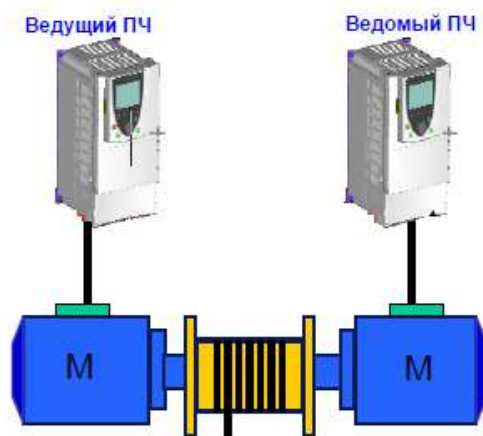


Рисунок 4 - Конфигурация «ведущий-ведомый»

1.5 Особенности двухдвигательного электропривода

Основное отличие многодвигательного электропривода от однодвигательного заключается в том, что силовой поток к ведомому звену передается не от одного, а от нескольких источников энергии (двигателей). Известно, что многодвигательный привод имеет ряд преимуществ перед однодвигательным, особенно в тяжелых технологических агрегатах. В теории электропривода отмечается, что многодвигательные электроприводы характеризуются большими возможностями в отношении

регулирования скорости и момента, взаимным резервированием мощности, снижением суммарного момента инерции системы по сравнению с системой однодвигательного электропривода, возможностью создания мощных установок при использовании серийных электрических машин относительно небольшой мощности, упрощением механического оборудования, лучшим конструктивным размещением электродвигателей.

Между тем практика эксплуатации многодвигательных электроприводов свидетельствует о том, что в некоторых механизмах возбуждаются интенсивные колебательные процессы в трансмиссиях, что в значительной степени перегружает, а в ряде случаев вызывает разрушение деталей привода.

Известно, что даже в однотипных двигателях их механические характеристики могут отличаться друг от друга вследствие различия сопротивления обмоток, магнитных потоков и др. Все это в значительной степени обуславливает возбуждение сложных колебательных процессов, которые являются причиной неравномерности угловых скоростей двигателей и неизбежного перераспределения нагрузок на каждый двигатель. Неравномерное распределение моментов между электродвигателями, приводит к перегрузке одного из них, а также к неравномерному износу элементов кинематической передачи – шестерен редукторов, шпинделей и пр. Таким образом одной из важных проблем двухдвигательных систем машинных агрегатов является обеспечение равномерного распределения нагрузок между двигателями как в статических, так и в динамических режимах.

В этой связи изучим вопрос о распределении нагрузок в статике, рассмотрев простейшую модель двухдвигательного электропривода. На рисунке 5 показано распределение нагрузок между двумя асинхронными электродвигателями, механические характеристики которых различаются по жесткости. Двигатель Д2 с более мягкой характеристикой оказывается менее загруженным. Если двигатели имеют одинаковый номинальный

момент, равный половине момента сопротивления, то один двигатель окажется недогруженным (Д2), а другой (Д1) перегруженным, что приведет при продолжительной работе к перегреву двигателя (Д1), вследствие чего он может выйти из строя. [7]

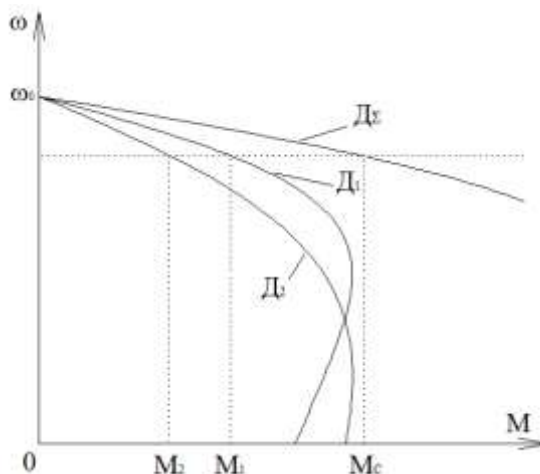


Рисунок 5 – Распределение нагрузок в приводе с двумя асинхронными электродвигателями.

На основании выше рассмотренного, в работе будет рассмотрен двухдвигательный асинхронный электропривод согласованного вращения механизмов передвижения козлового крана. Управление данными многодвигательными электроприводами будет осуществляться от отдельных преобразователей частоты.

Учитывая требования и специфику, предъявляемых к механизмам передвижения козловых кранов, необходимо добиться полной согласованности скоростей электроприводов и обеспечить оптимальные критерии разгона, торможения и устойчивости к любым динамическим воздействиям, связанных с неравномерностью распределения нагрузок.

2 Выбор оборудования и расчет электропривода механизма передвижения козлового крана

2.1 Выбор двигателя

Козловой кран ЛТ-62 предназначен для работы под открытым небом, поэтому выбор мощности двигателя основан на расчете усилий, возникающих в механизме, согласно. [5, 8, 9]

Изобразим нагрузочную диаграмму, которую должен выполнять заданный механизм для выполнения технологического цикла. Данные диаграммы в дальнейшем будут использоваться при исследовании имитационном проектировании.

Кран перемещаемся поперечно в одном направлении сначала массу m_1 в течение времени t_{p1} , затем массу m_2 в течение времени t_{p2} . Причем $t_{p1}=t_{p2}=t_p$. Между перемещениями грузов имеются равные паузы t_n для снятия и загрузки груза. Тогда нагрузочная диаграмма будет иметь вид (рисунок 6).

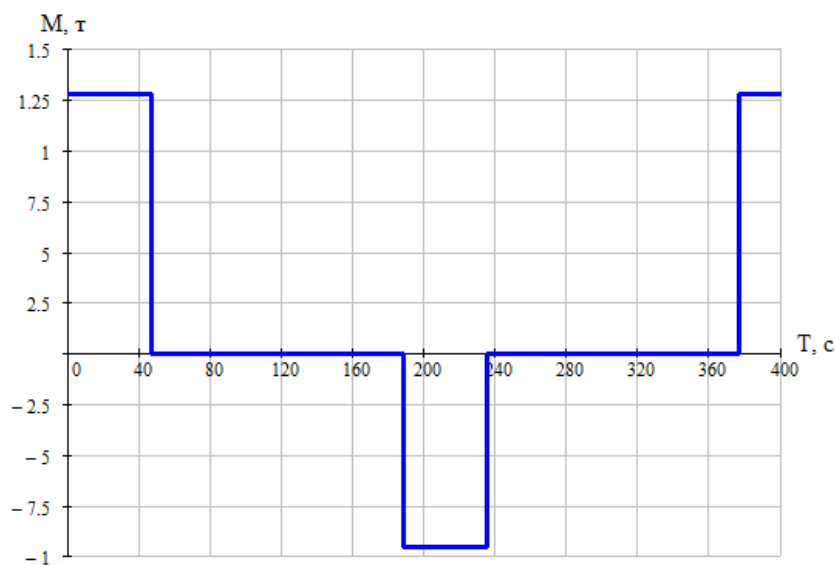


Рисунок 6 – Нагрузочная диаграмма

Массы m_1 и m_2 находим как

$$m_1 = m_n + m_{кр} = 32000 + 95600 = 127600 \text{ кг.} \quad (1)$$

$$m_2 = m_{кр} = 95600 \text{ кг.} \quad (2)$$

где m_n – грузоподъемность номинальная, т;

$m_{кр}$ – масса конструктивная, т.

Время работы t_p определим по величине перемещения L и номинальной скорости крана v_n

$$t_p = \frac{L}{v_n} = \frac{40 \cdot 60}{51} = 47,059 \text{ с.} \quad (3)$$

Цикл $t_{ц}$ определяется временем, поле которого процесс повторяется

$$t_{ц} = \frac{2 \cdot t_p}{ПВ} = \frac{2 \cdot 47,059}{0,25} = 376,471 \text{ с.} \quad (4)$$

Времена пауз t_n определяем по исходным данным механизма как

$$t_n = t_p \cdot \frac{1 - ПВ}{ПВ} = 47,059 \cdot \frac{1 - 0,25}{0,25} = 141,176 \text{ с.} \quad (5)$$

Суммарное время пауз

$$t_{\Sigma} = t_n - 2 \cdot t_p = 397,471 - 2 \cdot 47,059 = 282,353 \text{ с.} \quad (6)$$

Определим мощности нагрузочной диаграммы. Схема приложения усилий для козлового крана представлена на рисунке 7.

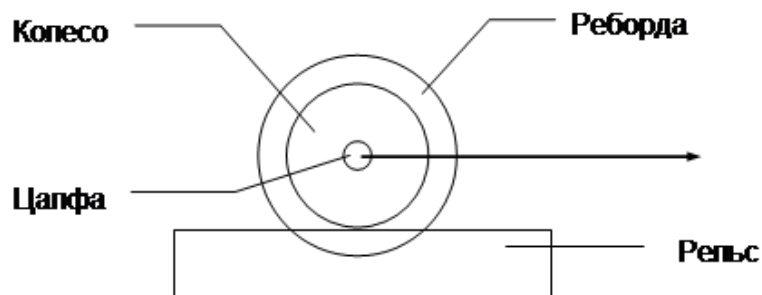


Рисунок 7 – Движение тележки по рельсовому пути

Усилие в этом случае определяется по формуле [8, 9]:

$$F = \frac{k_p \cdot m \cdot g \cdot (\mu \cdot r_{ц} + f)}{R_k} \quad (7)$$

где m – суммарная масса перевозимого груза, кг;

R_k – радиус ходового колеса, м;

μ – коэффициент трения в подшипниках качения колес по рельсам,
принимается $\mu=0,02$;

f – коэффициент качения ходовых колес по рельсам,

принимаем $f=0,0004$;

k_p – коэффициент, учитывающий сопротивление от трения реборд о рельсы,

принимаем $k_p=2,5$;

$r_{ц}$ – радиус цапфы ходового колеса, м;

Для перемещения крана с грузом определим F_1 , согласно формуле (7)

$$F_1 = \frac{k_p \cdot m_1 \cdot g \cdot (\mu \cdot r_{ц} + f)}{R_k} = \frac{0,25 \cdot 127600 \cdot 9,81 \cdot (0,02 \cdot 0,6 + 0,0004)}{0,3} = 16680 \text{ Н.}$$

Для перемещения крана без груза определим F_2 , согласно выражению (7)

$$F_2 = \frac{k_p \cdot m_2 \cdot g \cdot (\mu \cdot r_{ц} + f)}{R_k} = \frac{0,25 \cdot 95600 \cdot 9,81 \cdot (0,02 \cdot 0,6 + 0,0004)}{0,3} = 12500 \text{ Н.}$$

При известной скорости v_H передвижения механизма, статическая мощность передвижения определяется как

$$P_{ст} = F \cdot v_H \quad (8)$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$P_{ст1} = F_1 \cdot v_H = 16680 \cdot 0,85 = 14180 \text{ Вт,}$$
$$P_{ст2} = F_2 \cdot v_H = 12500 \cdot 0,85 = 10630 \text{ Вт.}$$

Найдем КПД передачи $\eta_{пер}$

$$\eta_{пер} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{пер.ном}} + \frac{\alpha}{k_3} - \alpha} \quad (9)$$

где $\eta_{пер.ном}$ – номинальный КПД кинематической схемы, равный произведению ее отдельных частей,

принимаем $\eta_{пер.ном}=0,92$;

α – коэффициент, применяемый равным 0,08;

k_3 – коэффициент загрузки

$$k_3 = \frac{m}{m_H + m_{кр}} \quad (10)$$

Выражение (10) для случая перемещения крана с грузом коэффициент загрузки

$$k_{31} = \frac{m_1}{m_H + m_{кр}} = \frac{127600}{32000 + 95600} = 1,0,$$

тогда

$$\eta_{пер1} = \frac{1}{\frac{1}{0,92} + \frac{0,8}{1,0} - 0,8} = 0,92.$$

Аналогично, из выражения (10) определяем параметры для режима перемещения крана без груза

$$k_{32} = \frac{m_2}{m_H + m_{кр}} = \frac{95600}{32000 + 95600} = 0,749,$$

тогда

$$\eta_{пер2} = \frac{1}{\frac{1}{0,92} + \frac{0,8}{0,749} - 0,8} = 0,738.$$

Определяем эквивалентную мощность

$$P_{\text{э}} (ПВ = 25\%) = \sqrt{\frac{P_{ст1}^2 \cdot t_{п1} + P_{ст1}^2 \cdot t_{п2}}{t_{п1} + t_{п2}}} = \sqrt{\frac{14180 \cdot 47,059 + 10630 \cdot 47,059}{47,059 + 47,059}} = \quad (11)$$

= 12530 Вт.

Определим мощность двигателя с учетом коэффициента запаса

$$P_{\text{расч}} = k_3 \cdot \frac{P_{\text{э}}}{\eta_{\text{пер.ном}}} = 1,35 \cdot \frac{12530}{0,92} = 18390 \text{ Вт.} \quad (12)$$

где k_3 – коэффициент запаса, учитывает дополнительный нагрев двигателя за время переходных процессов, который не учтен при предварительном выборе мощности,

принимаем $k_3 = 1,35$;

Рассчитанную мощность при реальном ПВ приводим к мощности при стандартном $ПВ_{ст} = 40\%$

$$P_{\text{расч}} (ПВ = 40\%) = P_{\text{расч}} (ПВ = 25\%) \cdot \sqrt{\frac{25}{40}} = 18390 \cdot \sqrt{\frac{25}{40}} = 14540 \text{ Вт.} \quad (13)$$

Т.к. привод механизма передвижения крана отдельный, то выбираем двигатель приблизительно в два раза по мощности меньше расчетной. По каталогу, в соответствии с принятым $P_{\text{расч}}$, выбираем двигатель так чтобы $P_{\text{н}} > P_{\text{расч}}$.

По каталогу выбирается несколько электродвигателей ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения. [11]

Таблица 5 - Электродвигатели ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения

Тип двигателя	$P_{\text{н}}$, кВт	Частота вращения, об/мин	$\eta_{\text{н}}$, %	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$J_{\text{дв}}$, кг · м ²
МТКН 311-8	7,5	690	80,5	0,63	0,281
АМТКФ132L6	7,5	900	87	0,87	0,085

Для каждого двигателя вычисляется передаточное отношение (число) редуктора

$$i_{\text{р}} = \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{max м}}}; \quad (14)$$

где $n_{\text{н}}$ – номинальная частота вращения двигателя;

$n_{\text{max м}}$ – частота вращения производственного механизма;

$$n_{\text{max м}} = \frac{v_{\text{пер}}}{R_{\text{к}} \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{51}{0,3 \cdot 2 \cdot \pi} = 27 \text{ об/мин.} \quad (15)$$

$$i_{\text{р1}} = \frac{n_{\text{н1}}}{n_{\text{max м}}} = \frac{690}{27} = 25,5;$$

$$i_{\text{р2}} = \frac{n_{\text{н2}}}{n_{\text{max м}}} = \frac{900}{27} = 33,3.$$

Для каждого двигателя определяется оптимальное, по условию минимизации времени пуска, передаточное отношение редуктора

$$i_{\text{оптр}} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}}. \quad (16)$$

где J_M - момент инерции производственного механизма;

$J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя;

k – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

принимаем $k=1,3$.

$$i_{оптр1} = \sqrt{\frac{J_M}{k \cdot J_{дв1}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \cdot 0,281}} = 1,36;$$

$$i_{оптр2} = \sqrt{\frac{J_M}{k \cdot J_{дв2}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \cdot 0,085}} = 2,48.$$

Для каждого двигателя определяется отношение выбранного стандартного передаточного отношения редуктора к оптимальному передаточному отношению

$$\Theta = \frac{i_{оптр}}{i_{стр}}; \quad (17)$$

$$\Theta_1 = \frac{i_{оптр1}}{i_{стр1}} = \frac{1,36}{25} = 0,055;$$

$$\Theta_2 = \frac{i_{оптр2}}{i_{стр2}} = \frac{2,48}{31,5} = 0,079.$$

Промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [4, 12]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора находим следующим образом:

$$i_{стр} = i_{ст} \cdot 10^x \quad (18)$$

где $i_{ст}$ – стандартное передаточное число редуктора;

принимаем $i_{ст1}=25$, $i_{ст2}=31,5$;

x – целое число;

принимаем $x=1$;

$$i_{\text{стр1}} = i_{\text{ст1}} \cdot 10^x = 2,5 \cdot 10^1 = 25;$$

$$i_{\text{стр2}} = i_{\text{ст2}} \cdot 10^x = 3,15 \cdot 10^1 = 31,5.$$

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается из ряда как ближайшее меньшее к расчетному:

$$i_{\text{стр}} \leq i_{\text{р}};$$

$$25 \leq 25,5;$$

$$31,5 \leq 33,3.$$

Двигатель с большей Θ принимается в качестве приводного.

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии АМТКФ132L6, технические данные представлены в таблице 6. [11, 12]

Таблица 6 – Технические данные асинхронного двигателя АМТКФ132L6

Тип двигателя	P_n , кВт	Частота вращения, об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
АМТКФ132L6	7,5	900	87	0,87	0,085
	$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n}$	$m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_n}$	$k_{i_{\text{дв}}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_n}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$	s_n , %
	2,2	-	4,2	2,2	10

2.2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя

В справочной литературе отсутствуют параметры схемы замещения электродвигателя. Для определения параметров воспользуемся наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 8. [12]

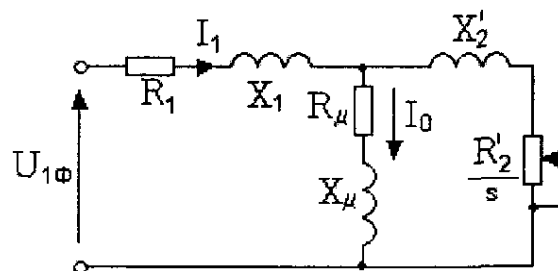


Рисунок 8 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - j \cdot x_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - \bar{R}_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_1 - j \cdot x_{2\sigma} \cdot \bar{I}_2 + \frac{\bar{R}_2}{s} \cdot \bar{I}_2 &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{I}_0 &= 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где $U_{1\phi}$ - фазное напряжение обмотки статора двигателя,

E_1 - ЭДС обмотки статора,

$x_{1\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора,

R_1 - активное сопротивление обмотки статора,

$x_{2\sigma}$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,

R_2 - активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,

I_1 - ток обмотки статора,

I_2 - ток обмотки ротора, приведенной к обмотке статора,

I_0 - ток холостого хода обмотки статора.

Исходными данными являются каталожные данные асинхронного двигателя АМТКФ132М6, представленные в таблице 6.

Ток холостого хода асинхронного двигателя можно найти по следующему выражению:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* I_{1H} (1 - s_H)}{(1 - p_* s_H)} \right]^2}{1 - \left[\frac{p_* (1 - s_H)}{(1 - p_* s_H)} \right]^2}} = \sqrt{\frac{11,007^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 15,013 \cdot (1 - 0,1)}{(1 - 0,75 \cdot 0,1)} \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,1)}{(1 - 0,75 \cdot 0,1)} \right]^2}} = 1,552 A, \quad (20)$$

где s_H - номинальное скольжение;

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{104,72 - 94,248}{104,72} = 0,1, \quad (21)$$

где ω_0 - скорость холостого хода, рад/с;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\max}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104,72 \text{ рад / с}; \quad (22)$$

ω_H - номинальная скорость вращения, рад/с;

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 900}{60} = 94,248 \text{ рад / с}; \quad (23)$$

I_{1H} - номинальный ток статора двигателя;

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,87} = 15,013 \text{ А}. \quad (24)$$

I_{11} - ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_{\text{ж}}} \cdot \eta_{p_{\text{ж}}}} = \frac{0,75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,87} = 11,007 \text{ А}. \quad (25)$$

Коэффициент загрузки двигателя

$$p_{\text{ж}} = \frac{P}{P_H} = 0,75 \quad (26)$$

Из формулы Клосса определяем соотношение, которое необходимо для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = \quad (27)$$

$$= 0,1 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,1 \cdot (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,542.$$

значение коэффициента β находится в диапазоне 0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем $\beta = 1$.

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{1,552}{2 \cdot 4,2 \cdot 15,013} = 1,012. \quad (28)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_H^2 (1 - s_H)}{2 \cdot C_1^2 \cdot m_k \cdot P_H \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,1)}{2 \cdot 1,012^2 \cdot 2,2 \cdot 7500 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,542} \right)} = 1,358 \text{ Ом}. \quad (29)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,012 \cdot 1,358 \cdot 2 = 1,375 \text{ Ом.} \quad (30)$$

Определим параметр γ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{кн}}$:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,542^2}\right) - 1^2} = 1,551. \quad (31)$$

тогда

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 1,551 \cdot 1,012 \cdot 1,358 = 2,132 \text{ Ом.} \quad (32)$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления $X_{\text{кн}}$ сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, необходимо воспользоваться соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано

$$X_{2\sigma}' = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 2,132}{1,012} = 1,222 \text{ Ом.} \quad (33)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 1,222 = 0,896 \text{ Ом.} \quad (34)$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} - R_1 I_{\text{н}})^2 + (U_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}} + X_{1\text{н}} I_{\text{н}})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,87 - 1,375 \cdot 15,013)^2 + (220 \cdot 0,493 - 0,896 \cdot 15,013)^2} = 195,42 \text{ В.} \end{aligned} \quad (35)$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195,42}{1,552} = 125,891 \text{ Ом.} \quad (36)$$

Исходя из расчетов индуктивных сопротивлений, рассчитаем индуктивность обмотки статора, ротора, намагничивания

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,896}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,851 \text{ мГн;} \quad (37)$$

$$L_2 = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1,222}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,889 \text{ мГн}; \quad (38)$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{125,891}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,40072 \text{ Гн}. \quad (39)$$

Проверяем адекватность расчетных параметров двигателя.

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = \quad (40)$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,358}{104,72 \cdot 0,1 \cdot \left[2,132^2 + \left(1,375 + \frac{1,358}{0,1} \right)^2 + \left(\frac{1,375 \cdot 1,358}{0,1 \cdot 125,891} \right)^2 \right]} = 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} = \quad (41)$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,40072}{(0,40072 + 3,889 \cdot 10^{-3})} \cdot 0,88 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{15,013^2 - 1,552^2} = 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где $\Psi_{\text{н}}$ – номинальное значение потокосцепления, Вб

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 1,552 \cdot 0,40072 = 0,88 \text{ Вб} \quad (42)$$

Проверяем выполнения условий:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} \cong M_{\text{эм.н}}^*$$

$$79,577 \text{ Н} \cdot \text{м} < 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 87,535 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \cong 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В результате расчета определим значение момента от сил трения двигателя

$$\Delta M_{\text{с. дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 82,509 - 79,577 = 2,932 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (43)$$

2.3 Выбор преобразователя частоты

Очень важно сделать правильный выбор преобразователя. От него будет зависеть эффективность и ресурс работы преобразователя частоты и

всего электропривода в целом. Так если мощность преобразователя будет слишком завышена, он не сможет в должной мере обеспечить защиту двигателя. С другой стороны, если мощность преобразователя мала, он не сможет обеспечить высокодинамичный режим работы и из-за перегрузок может выйти из строя.

Правильная эксплуатация так же сильно влияет на срок службы преобразователя. При выборе преобразователя частоты надо руководствоваться не только мощностью подключаемого двигателя, а также диапазоном рабочих скоростей двигателя, диапазоном рабочих моментов вращения, характером нагрузки и циклограммой работы.

Рассматривая особенности построения многодвигательных приводов, связанных общим механическим валом, и рекомендации по реализации и настройке таких систем, управлять такими системами позволяют преобразователи частоты Schneider Electric Altivar 71.

Сегодня многодвигательные приводы промышленных установок все чаще выполняются как регулируемые электроприводы переменного тока на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя, питаемого от преобразователя частоты.

Силовая часть многодвигательных электроприводов может быть построена как по схеме с общим ПЧ, так и с индивидуальными преобразователями, обеспечивающими более гибкое управление промышленными установками. В обоих случаях отличительной особенностью таких установок является общая нагрузка, и проблема обеспечения ее равномерного распределения между двигателями является одной из важнейших для многодвигательных электроприводов.

Наиболее точное выравнивание нагрузки обеспечивается в многодвигательных системах с индивидуальными взаимосвязанными электроприводами, выполненными по схеме «Ведущий-ведомый».

В преобразователе частоты Altivar 71 имеется прикладная макроконфигурация «Ведущий-ведомый», значительно облегчающая настройку и ввод в эксплуатацию многодвигательных приводов.

Серия преобразователей частоты Altivar 71 отвечает самым строгим требованиям применений, благодаря использованию разнообразных законов управления двигателем и многочисленным функциональным возможностям. Она адаптирована для решения наиболее сложных задач электропривода:

- момент и повышенная точность при работе на очень низкой скорости и улучшенные динамические характеристики с алгоритмами векторного управления потоком в разомкнутой или замкнутой системе привода;

- расширенный диапазон выходной частоты для высокоскоростных двигателей; параллельное включение двигателей и специальные приводы с использованием скалярного закона управления; точность поддержания скорости и энергосбережение для разомкнутого привода с синхронным двигателем;

- плавное, безударное управление несбалансированными механизмами с помощью системы адаптации мощности (EnergyAdaptationSystem - ENA).

С расширением гаммы сетевого питания до ~690 В многофункциональность преобразователя Altivar 71 увеличивает производительность и гибкость использования машин для подъемно-транспортного оборудования:

- Управление тормозом, адаптированное для приводов перемещения, подъема и поворота.

- Весоизмерение.

- Подъем с повышенной скоростью.

- Контроль состояния тормоза.

- Управление воздействием концевых выключателей окончания хода.

- Выбор слабины тросов.

Технические параметры преобразователя частоты Schneider Electric Altivar 71 представлены в таблице 7. [13]

Таблица 7 – Технические параметры преобразователя частоты

Марка	Schneider Electric Altivar 71		
Электропривод	Выходная частота	1 - 1600 Гц	
	Закон управления	Векторное управление потоком в разомкнутой и замкнутой системах, закон “напряжение/частота” (2 или 5 точек), система адаптации мощности	
	Переходный момент	220 % номинального момента двигателя в течение 2 с 170 % в течение 60 с	
Функции	Количество функций	> 150	
	Количество предварительно заданных скоростей	16	
	Количество входов-выходов	Аналоговые входы	2-4
		Дискретные входы	6-29
		Аналоговые выходы	1-3
		Дискретные выходы	0-8
Релейные выходы		2-4	
Коммуникационная связь	Встроенная	Modbus и CANopen	
Карты (дополнительные)		Интерфейсные карты для датчиков абсолютного и относительного отсчета, резольвера, карты расширения входов-выходов Карта программируемого контроллера	
Полная мощность		17,8 кВА	
Максимальный переходный ток		26,4А	
Максимальный ток в установившемся режиме		17,6 А	
Масса		7 кг	
Нормы и сертификаты		МЭК/EN 61800-5-1, МЭК/EN 61800-3 (окружающая среда 1 и 2, C1 - C3), EN 55011, МЭК/EN 61000-4-2/4-3/4-4/4-5/4-6/4-11 e, UL, CSA, DNV, C-Tick, NOM 117, ГОСТ	

2.4 Расчет естественных характеристик электропривода

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя

определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя. [12, 14]

При векторном управлении рассчитываются и строятся только естественные механическую и электромеханическую характеристики электродвигателя при номинальном значении напряжения $U_{1н}$ и частоты $f_{1н}$.

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

$$M_{эм}(s) = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} \quad (44)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Нм.

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega=f(M)$ при $f_{1н}=50$ Гц, где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению.

Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рисунке 9.

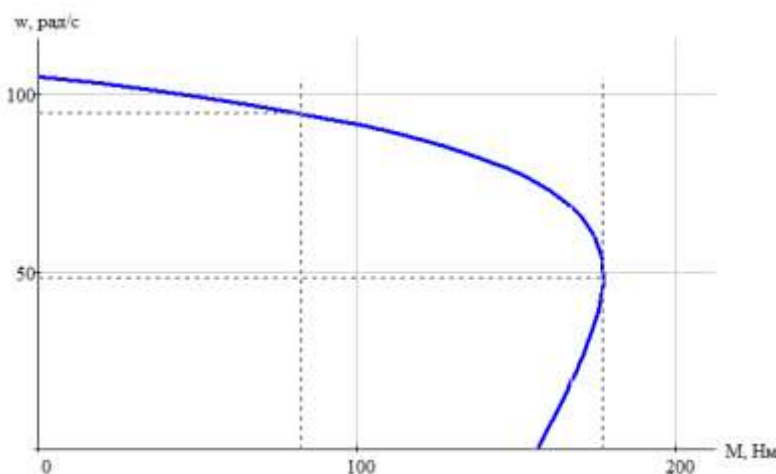


Рисунок 9 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АМТКФ132L6

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(s)$ электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1н}=50$ Гц по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (45)$$

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

$$I_2'(s) = \frac{U_{1H}}{\pm \sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad (46)$$

I_2' – приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} \quad (47)$$

I_0 – действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad (48)$$

По результатам расчета строятся электромеханическая характеристика $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(I_2')$ (рисунок 10) при $f_{1H} = 50$ Гц.

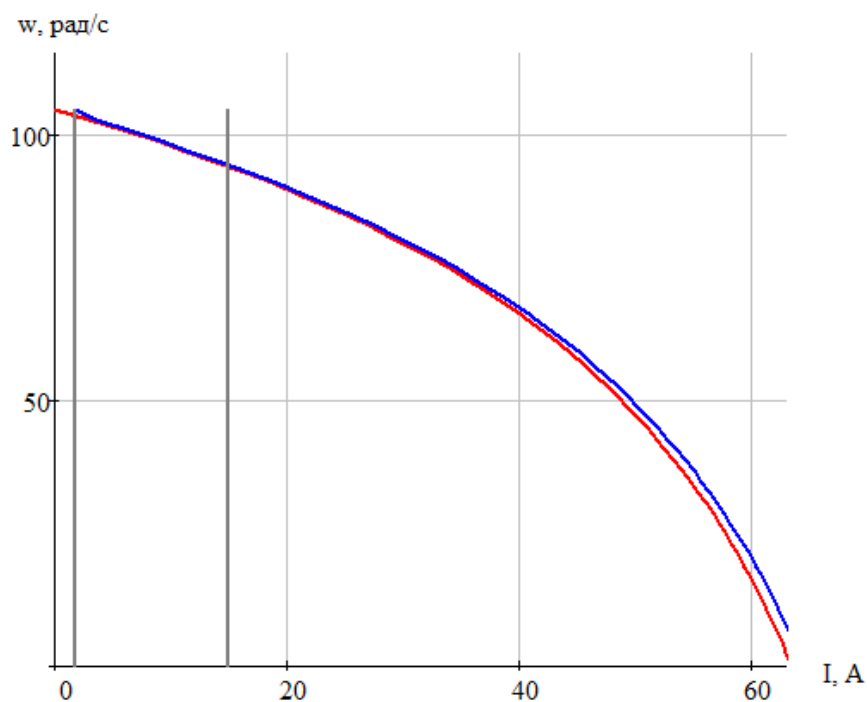


Рисунок 10 – Естественные электромеханические характеристики асинхронного двигателя АМТКФ132L6

2.5 Расчет статических характеристик двигателя и элементов силового канала и нагрузки электропривода при частотном векторном управлении

При векторном управлении следует рассчитать и построить только естественные механическую $\omega(M_{эм})$ и электромеханическую $\omega(I_1)$ характеристики электродвигателя при номинальном значении напряжения $U_{1н}$ и частоты $f_{1н}$ по приведенным выше выражениям. [14]

На полученную механическую характеристику $\omega(M)$ рисунка 9 наносятся граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{эп.макс} = 130,4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{сприв.мин} = 10,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{сприв.макс} = 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{эмн} = 82,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{к} = 177,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{дл.доп} = 74,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На рисунке 11 в плоскости механических характеристик построены характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки.

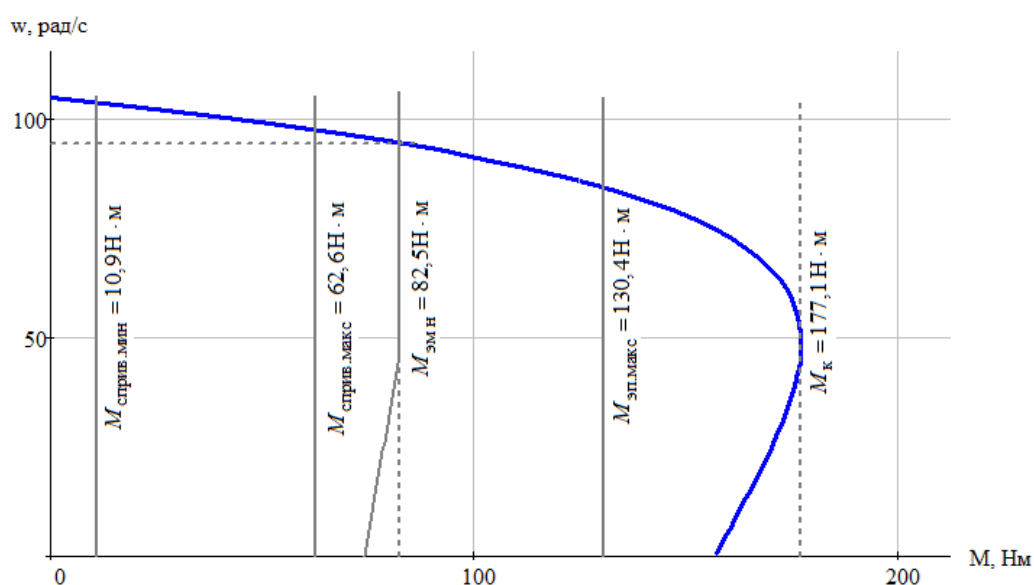


Рисунок 11 – Механические характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки

На рисунке 12 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки.

$$I_0 = 1,552 \text{ A};$$

$$I_{\text{смин}} = 2,469 \text{ A};$$

$$I_{\text{смакс}} = 10,251 \text{ A};$$

$$I_{\text{эпмакс}} = 21,12 \text{ A};$$

$$I_{1\text{н}} = 15,013 \text{ A};$$

$$I_{\text{дл.доп}} = 13,512 \text{ A};$$

$$I_{\text{ином}} = 17,6 \text{ A};$$

$$I_{\text{имакс}} = 26,4 \text{ A}.$$

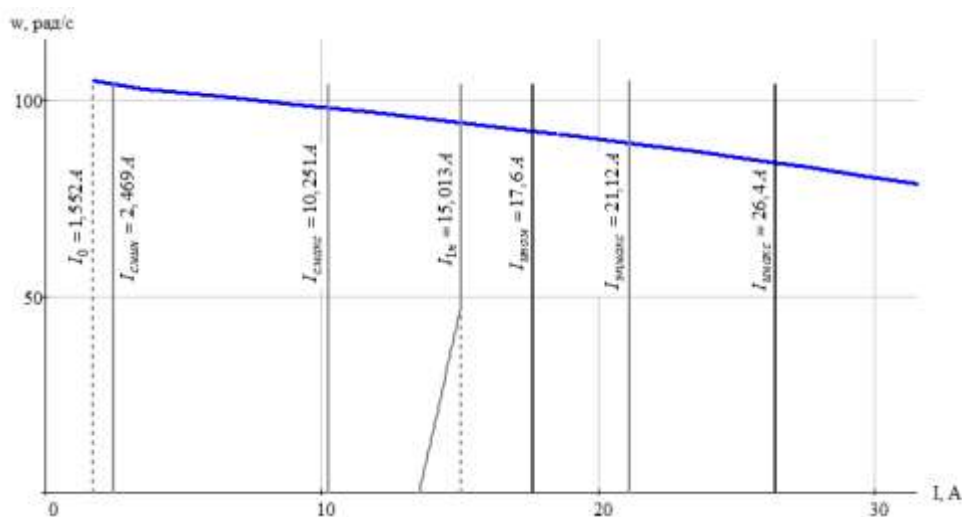


Рисунок 12 – Электромеханические характеристики асинхронного двигателя и характеристики нагрузки

Проверка правильности выбора двигателя

По результатам построения механических характеристик электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ (рисунок 11) проверяется правильность выбора двигателя по моменту. Во всем диапазоне должны выполняться условия

$$M_{\text{эм.длит.доп}} \geq M_{\text{с макс}};$$

$$77,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 12) проверяется правильность выбора двигателя по току

$$I_{\text{дв.длит.доп}} \geq I_{\text{с макс}} ;$$

$$13,5 \text{ А} > 10,2 \text{ А}.$$

Следовательно, двигатель по току выбран правильно.

Проверка правильности выбора преобразователя

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 12) проверяется правильность выбора преобразователя по току:

– условие

$$I_{\text{с макс}}(\omega) \leq 0,8 \cdot I_{\text{и.н}} ;$$

$$10,2 \text{ А} \leq 0,8 \cdot 17,6 = 14,8 \text{ А}.$$

– условие

$$I_{\text{эп.макс}}(\omega) \leq I_{\text{и.макс}} ;$$

$$21,12 \text{ А} \leq 26,4 \text{ А}.$$

Следовательно, преобразователь выбран правильно.

2.6 Параметры, структурные схемы и модели системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Параметры звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 2,851 \cdot 10^{-3} + 0,40072 = 0,40357 \text{ Гн.} \quad (49)$$

– ротора, приведенная к цепи статора,

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 3,889 \cdot 10^{-3} + 0,40072 = 0,40461 \text{ Гн.} \quad (50)$$

Коэффициент рассеяния магнитного поля

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,40072^2}{0,40357 \cdot 0,40461} = 0,017. \quad (51)$$

Эквивалентное активное сопротивление цепи статора (без учета сопротивления соединительных проводов)

$$R_{1\sigma} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 1,375 + 1,358 \cdot \frac{0,40072^2}{0,40461^2} = 2,707 \text{ Ом.} \quad (52)$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0,017 \cdot 0,40357}{2,707} = 2,476 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \quad (53)$$

$$T_2 = \frac{L_2'}{R_2'} = \frac{0,40461}{1,358} = 0,29794 \text{ с.} \quad (54)$$

Параметры преобразователя

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

$$T_{\text{и}} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с.} \quad (55)$$

где $f_{\text{ШИМ}}$ – несущая частота инвертора (частота ШИМ);

принимаяем $f_{\text{ШИМ}} = 10000 \text{ Гц}$.

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

$$U_{\text{T}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{1фн}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В.} \quad (56)$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду параметры преобразователя выбираются в соответствии с приведенными ниже выражениями.

Линейное напряжение источника питания преобразователя

$$U_{\text{с}} = \frac{U_{\text{д}}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35} = 420,185 \text{ В.} \quad (57)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение звена постоянного тока преобразователя;

принимаяем исходя из условия согласования напряжения преобразователя и двигателя.

$$U_{\text{д}} \geq \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ин}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220 = 538,88 \text{ В.} \quad (58)$$

Коэффициент усиления инвертора

$$k_n = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = \frac{538,88}{\sqrt{3}} = 311,127. \quad (59)$$

Двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана будет включать в себя два асинхронных двигателя АМТКФ132М6 мощность 7,5кВт (таблица 6) с индивидуальными преобразователями частоты Schneider Electric Altivar 71 (таблица 7).

Рассчитанные параметры преобразователя частоты, асинхронного двигателя, а также механические и электромеханические характеристики являются основой для дальнейшего изучения двухдвигательного электропривода.

3 Оптимизация контуров регулирования

Характерной особенностью частотно-регулируемых электроприводов переменного тока является относительно большая инерционность в цепи обратной связи контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости. По этой причине для их оптимизации не могут быть применены классическая теория оптимизации систем подчиненного регулирования, изложенная в работах Кесслера. Далее будут использованы методы оптимизации контуров регулирования с инерционной обратной связью, изложенные в учебном пособии. [1, 14, 15]

3.1 Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором

Структурная схема контура тока приведена на рисунок 13. Контуров токов I_{1d} и I_{1q} реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры

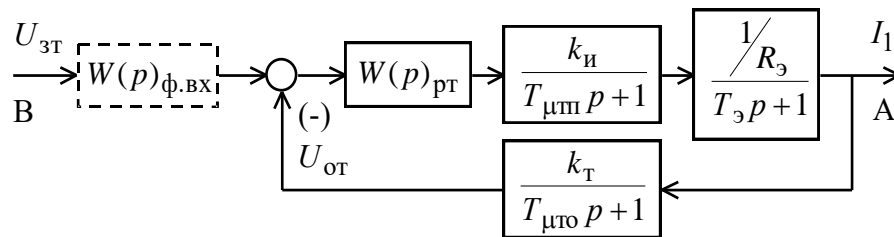


Рисунок 13 - Структурная схема контура тока

Оптимизируем данный контур по модулю

$$W_{\text{разл}} = W_{\text{пт}} \cdot \frac{k_{\text{ин}}}{T_{\mu\text{пт}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{R_{\text{э}}} \cdot \frac{k_{\text{дт}}}{T_{\text{дт}} \cdot p + 1} \quad (60)$$

Постоянные времени $T_{\text{пт}}$ и $T_{\text{дт}}$ обычно гораздо меньше, чем $T_{\text{э}}$, поэтому относим их к не компенсируемому малому постоянному времени. В соответствии с этим появляется возможность понизить порядок системы:

$$W_{\text{разл}} \approx W_{\text{пт}} \cdot \frac{k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{дт}}}{T_{\mu\text{пт}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{R_{\text{э}}}, \quad (61)$$

где $T_{\mu\text{пт}}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

Для настройки на оптимум по модулю необходим ПИ-регулятор

$$W_{\text{рт}} = \frac{k_{\text{рт}} \cdot (T_{\text{рт}} \cdot p + 1)}{T_{\text{рт}} \cdot p}, \quad (62)$$

где $T_{\text{рт}}$ – постоянная времени регулятора тока,

принимаяем $T_{\text{рт}} = T_{1\Omega} = 0,2476$ с;

$k_{\text{рт}}$ – коэффициент регулятора тока;

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_{1\Omega} \cdot R_{\Omega}}{2 \cdot T_{\text{мл}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{дт}}}. \quad (63)$$

В результате передаточная функция разомкнутого контура тока соответствует настройке на оптимум по модулю:

$$W_{\text{разл}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{мл}} \cdot p \cdot (T_{\text{мл}} \cdot p + 1)}. \quad (64)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W_I = \frac{W_{\text{разл}}}{1 + W_{\text{разл}}} \cdot \frac{T_{\text{дт}} \cdot p + 1}{k_{\text{дт}}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{мл}} \cdot p \cdot (T_{\text{мл}} \cdot p + 1) + 1} \cdot \frac{T_{\text{дт}} \cdot p + 1}{k_{\text{дт}}}. \quad (65)$$

Пренебрегая в знаменателе членом второго порядка малости, а в числителе постоянная времени $T_{\text{дт}} \approx 0$, передаточная функция контура тока

$$W_I \approx \frac{1}{2 \cdot T_{\text{мл}} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{\text{дт}}}{k_{\text{дт}}}. \quad (66)$$

3.1.1 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров тока [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока $\sigma_T \geq 1,2$.

Коэффициент датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{анл.дт}}}}{\sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эл.макс}}} = \frac{0,5 \cdot 2^{10}}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 21,12} = 14,285.$$

Значение максимального задания на входе контура тока $N_{\text{зт.макс}}$

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_T} = \frac{1}{1,2} = 0,8333.$$

тогда

$$k_T = \frac{1}{\sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,013} = 0,039,$$

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{k_T} = \frac{1}{0,039} = 0,07.$$

Интервалы квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока

$$T_{\text{ф.от}} = 0$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_T = 3$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока

$$T_{\mu\text{I}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_T} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{3} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура тока

$$a_T = 2.$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{Iэ}} \cdot R_{\text{Iэ}}}{k_{\text{и}} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu\text{I}}} = \frac{2,47601 \cdot 10^{-3} \cdot 2,707}{311,127 \cdot 0,039 \cdot 2 \cdot 1,333 \cdot 10^{-4}} = 2,058 \text{ о.е.}$$

Эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока

$$T_T = a_T \cdot T_{\mu\text{I}} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

3.2 Оптимизация контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором приведена на рисунке 14.

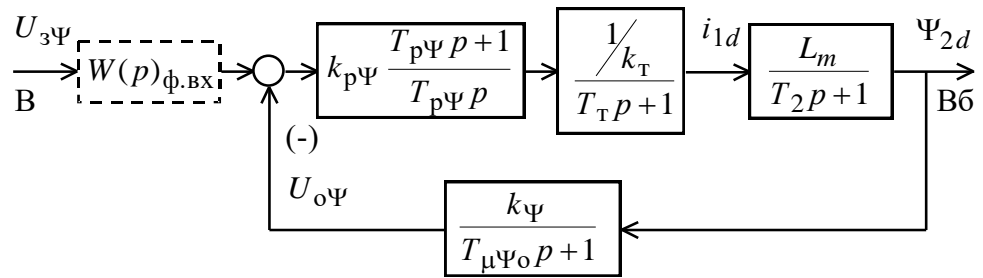


Рисунок 14 - Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка (выражение (66)).

Коэффициент обратной связи контура по потокосцеплению

$$k_{\Psi} = \frac{U_{3\Psi_{\text{макс}}}}{\Psi_{2H}} \quad (67)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W_{p\Psi} = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p} \quad (68)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_{\Psi} \cdot a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi_3}} \cdot 1 \quad (69)$$

$$T_{p\Psi} = T_2 \quad (70)$$

где $T_{\mu\Psi_3}$ – эквивалентная малая постоянная контура потокосцепления, с.

Контур потокосцепления с ПИ-регулятором, настроенный таким образом, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W_{\Psi_{\text{раз}}} = \frac{1}{a_{\Psi} T_T T_{\mu\Psi_0} T_{\mu\Psi_3} p^3 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi_3}^2 p^2 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi_3} p} \quad (71)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W_{\psi \text{ зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\mu\Psi_0} p + 1)}{a_{\psi} T_{\tau} T_{\mu\Psi_0} T_{\mu\Psi_3} p^3 + a_{\psi} T_{\mu\Psi_3}^2 p^2 + a_{\psi} T_{\mu\Psi_3} p + 1} \approx \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\mu\Psi_0} p + 1)}{a_{\psi} T_{\mu\Psi_3}^2 p^2 + a_{\psi} T_{\mu\Psi_3} p + 1} \quad (72)$$

Настройка контура потокосцепления с ПИ-регулятором близка к настройке на МО системы 2-го порядка.

3.2.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров потокосцепления [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока
 $\sigma_{\psi} \geq 1,2$.

Коэффициент датчика потокосцепления

$$k_{\text{д}\psi} = \frac{1}{\sigma_{\tau} \cdot \psi_{2\text{н}}} = \frac{1}{1,2 \cdot 0,88} = 0,947.$$

Значение максимального задания на входе контура потокосцепления

$$N_{\text{з}\psi, \text{ макс}} = \frac{1}{\sigma_{\psi}} = \frac{1}{1,2} = 0,8333293$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiodическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_{\psi} = 2$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости

$$T_{\mu\Psi} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура тока

$$a_{\psi} = 2$$

Постоянная времени регулятора

$$T_{\text{р}\psi} = T_2 = 0,29794 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_{\text{дв}}} \cdot \frac{1}{a_\psi \cdot T_{\mu\psi}} = \frac{0,09794 \cdot 0,039}{0,40072 \cdot 0,947} \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}} = 14,008 \text{ о.е.}$$

3.3 Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором

Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором приведена на рисунке 15.

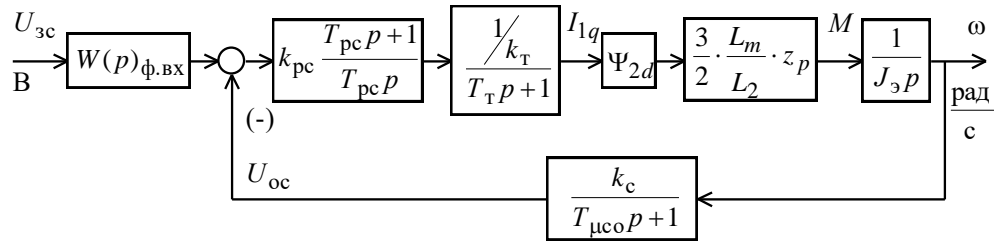


Рисунок 15 - Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка, согласно выражению (66).

Коэффициент обратной связи контура по потокосцеплению

$$k_\psi = \frac{U_{\text{з}\psi\text{ макс}}}{\Psi_{2н}} \quad (73)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W_{\text{рс}} = k_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{\text{рс}}p + 1}{T_{\text{рс}} \cdot p} \quad (74)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{\text{рс}} = \frac{J_\psi \cdot k_T}{\Psi_{2н} \cdot k_{\text{дв}} \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{с}\psi}}, \quad (75)$$

$$T_{\text{рс}} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{с}\psi}. \quad (76)$$

где $T_{\mu\psi}$ – эквивалентная малая постоянная контура потокосцепления, с.

Контур потокосцепления с ПИ-регулятором, настроенный таким образом, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W_{\text{сраз}} = \frac{b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1}{b_c a_c^2 T_{\tau} T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{сз}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^2 p^2}; \quad (77)$$

– замкнутого контура по управлению

$$\begin{aligned} W_{\text{сзам}} &= \frac{1}{k_c} \times \\ &\times \frac{(b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1) \cdot (T_{\mu\text{со}} p + 1)}{b_c a_c^2 T_{\tau} T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{сз}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1} \approx \\ &\approx \frac{\frac{1}{k_c} (b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1) \cdot (T_{\mu\text{со}} p + 1)}{b_c a_c^2 T_{\tau} T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{сз}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1}. \end{aligned} \quad (78)$$

Настройка контура потокосцепления с ПИ-регулятором близка к настройке на МО системы 2-го порядка.

3.3.1 Параметры настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Согласно рекомендациям по выбору параметров при настройке контуров скорости [14, 15] принимаем следующие значения:

Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости

$$\sigma_{\omega} \geq 1,2.$$

Коэффициент датчика скорости

$$k_{\text{д}\omega} = \frac{1}{\sigma_{\omega} \cdot \omega_{\text{н}}} = \frac{1}{1,2 \cdot 94,248} = 8,842 \cdot 10^{-3}.$$

Значение максимального задания на входе контура скорости

$$N_{\text{з}\omega, \text{макс}} = \frac{1}{\sigma_{\omega}} = \frac{1}{1,2} = 0,8333293.$$

Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiодическим звеном для электроприводов общепромышленного назначения

$$n_{\omega} = 2.$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости

$$T_{\mu\omega} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент типовой настройки контура скорости

$$a_{\omega} = 2.$$

Постоянная времени регулятора скорости

$$T_{p\omega} = T_{\mu\omega} \cdot 4 = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{pc} = \frac{J_{\omega} \cdot k_{\tau}}{\Psi_{2H} \cdot k_{дв} \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\omega}} = \frac{0,264 \cdot 0,039}{0,88 \cdot 4,457 \cdot 8,842 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3}} = 78,485.$$

При настройке системы управления электропривода используется один из универсальных регуляторов - ПИ-регулятор. Для каждого из контуров рассчитаны коэффициенты и постоянные времени регуляторов.

4 Разработка имитационной модели электропривода

4.1 Математическая модель асинхронного двигателя

Для исследования в среде Matlab воспользуемся двухфазной моделью реальной трёхфазной машины в системе координат d, q.

Если во вращающейся синхронно с полем статора ($\omega_{\text{кв}} = \omega_{\text{эл}}$) системе координат x, y ось x совместить с вектором потокосцепления ротора Ψ_2 , то с учетом соотношения, характерных для СК d, q,

$$\begin{aligned}\Psi_{2d} &= |\bar{\Psi}_2|; \\ \Psi_{2q} &= 0,\end{aligned}\tag{79}$$

получим

$$\begin{aligned}|\bar{\Psi}_2| &= \Psi_{2x} = \Psi_{2d}, \\ \Psi_{2y} &= \Psi_{2q} = 0\end{aligned}\tag{80}$$

и тогда система уравнений будет иметь вид

$$\left\{\begin{aligned}\frac{dI_{1d}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1d} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{\text{кв}} \cdot I_{1q}; \\ \frac{dI_{1q}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1q} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1q} - \omega_{\text{кв}} \cdot I_{1d} - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\ \frac{d\Psi_{2d}}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \Psi_{2d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1d}; \\ 0 &= \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1q} - (\omega_{\text{кв}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2d}; \\ M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c),\end{aligned}\right.\tag{81}$$

где $U_{1d} = U_{1q} = U_1$ – постоянные по форме составляющие напряжения статора в ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_2$, вращающейся синхронно с полем статора системе координат d, q;

I_{1d}, I_{1q} – составляющие тока статора в системе координат d, q, А;

$\Psi_{2d} = |\bar{\Psi}_2|$ – потокосцепление ротора в системе координат d, q, Вб.

В операторной форме записи

$$\begin{cases} U_{1d} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1d} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d} - \omega_{\text{кв}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}; \\ U_{1q} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1q} + \omega_{\text{кв}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2d} - L_m \cdot I_{1d}; \\ \omega_{\text{кв}} = z_p \cdot \omega + \frac{L_m \cdot R_2'}{L_2} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}}; \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c). \end{cases} \quad (82)$$

Уравнениям (1.22) соответствует приведенная на рисунке 16 структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выполненная во вращающейся системе координат d, q ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора.

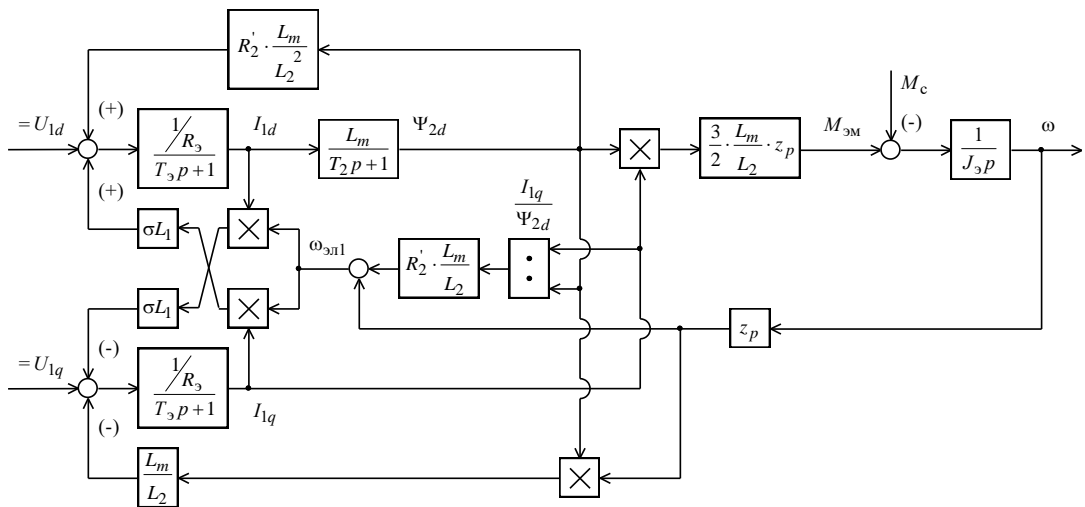


Рисунок 16 - Структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат d, q, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора

Структурная схема рисунок 16 содержит внутренние обратные связи, в том числе нелинейные перекрестные. Природа этих связей вытекает из схемы замещения рисунок 17 и уравнений напряжения статора системы (82):

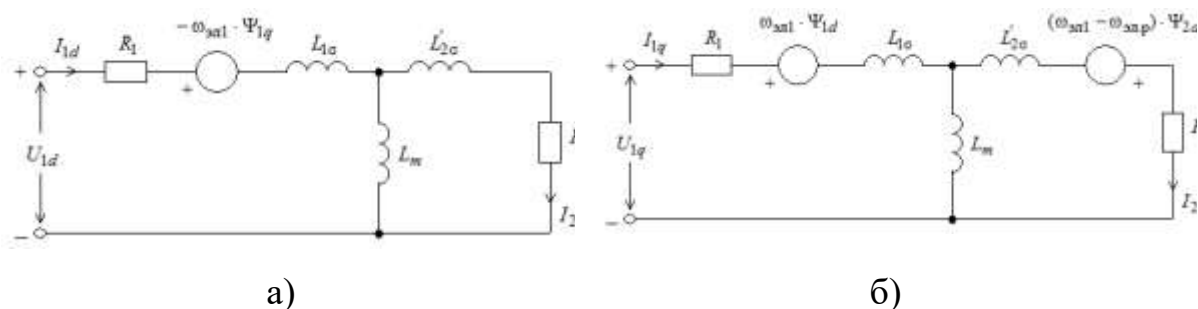


Рисунок 17 - Схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся со скоростью $\omega_{\text{син1}}$ ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_2$ роторной системе координат d, q:

а – по оси d;

б – по оси q

$$U_{1d} = R_s \cdot (T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1d} - e_d; U_{1q} = R_s \cdot (T_s \cdot p + 1) \cdot I_{1q} + e_q, \quad (83)$$

где e_d, e_q - составляющие внутренней ЭДС двигателя, наводимые в статоре;

$$e_d = \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{\text{кc}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}, \quad (84)$$

$$e_q = \omega_{\text{кc}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}.$$

$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d}$ - падение напряжения в роторной цепи;

$$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2d} = \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot (L_2 \cdot I_{2d} + L_m \cdot I_{1d}) = R_2' \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} \cdot I_{2d} + \frac{L_m^2}{L_2^2} \cdot I_{1d} \right). \quad (85)$$

$\omega_{\text{кc}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}, \omega_{\text{кc}} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d}$ - составляющие ЭДС самоиндукции (падения напряжения на индуктивном сопротивлении статора);

$\frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}$ - ЭДС вращения, наводимая в статоре потокосцеплением ротора.

Данной системе уравнений соответствует модель в Matlab Simulink, представленная на рисунке 18.

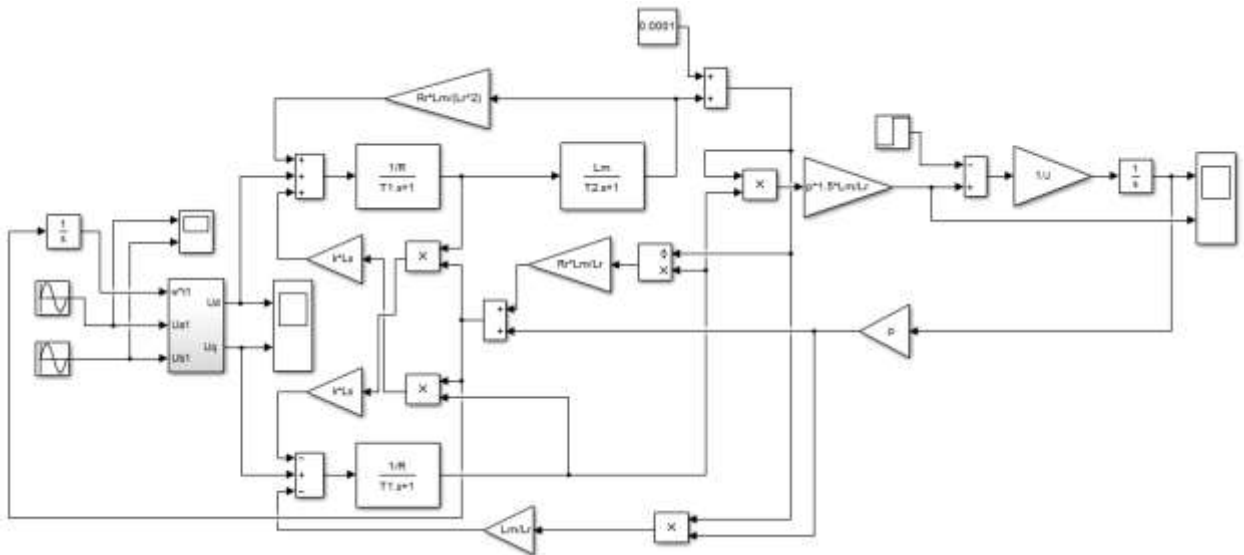


Рисунок 18 - Имитационная модель асинхронного двигателя с активной нагрузкой в Matlab Simulink

4.2 Механическая часть электропривода механизма передвижения козлового крана

Модель на рисунке 18 имеет активную нагрузку, так как в реальности нагрузка имеет реактивный характер, в модель необходимо дополнительно включить систему блоков имитирующую реактивную нагрузку. Для это используем блок S-Function Bilder.

Компонент, реализующий реактивный момент сопротивления:

if (w[0]>0) M[0]=Minput[0];

if (w[0]<0) M[0]= - Minput [0];

if (w[0]==0) Mc[0]=0;

Алгоритм функционирования будет следующий:

1.Если скорость положительная, то момент сопротивления равен заданному.

2.Если скорость отрицательная, то момент сопротивления равен заданному с обратным знаком.

3.Если скорость равна «0», то момент сопротивления равен 0.

Отключение двигателя от сети достигается за счет срабатывания блока «Switch» в 0,5 с.

Для удобства электромеханический преобразователь и механическую часть объединим в отдельные системы, результат представлен на рисунке 19.

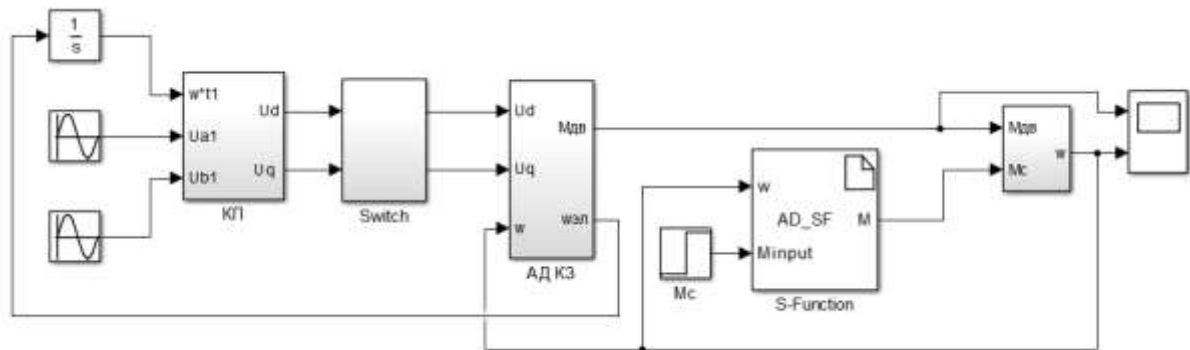


Рисунок 19 – Имитационная модель асинхронного двигателя с реактивной нагрузкой

Для проверки работоспособности имитационной модели реактивной нагрузки, произведем пуск двигателя на малой нагрузке $10\% \cdot M_n$ Н·м, увеличим нагрузку до номинальной 82,502 Н·м в момент времени 0,25 с. и отключим двигатель от сети в момент времени 0,5 с. Так как нагрузка реактивная двигатель должен затормозить выбегом. На рисунке 20 показаны полученные графики. Полученные графики соответствуют ожиданиям, следовательно, модель реактивной нагрузки работает правильно.

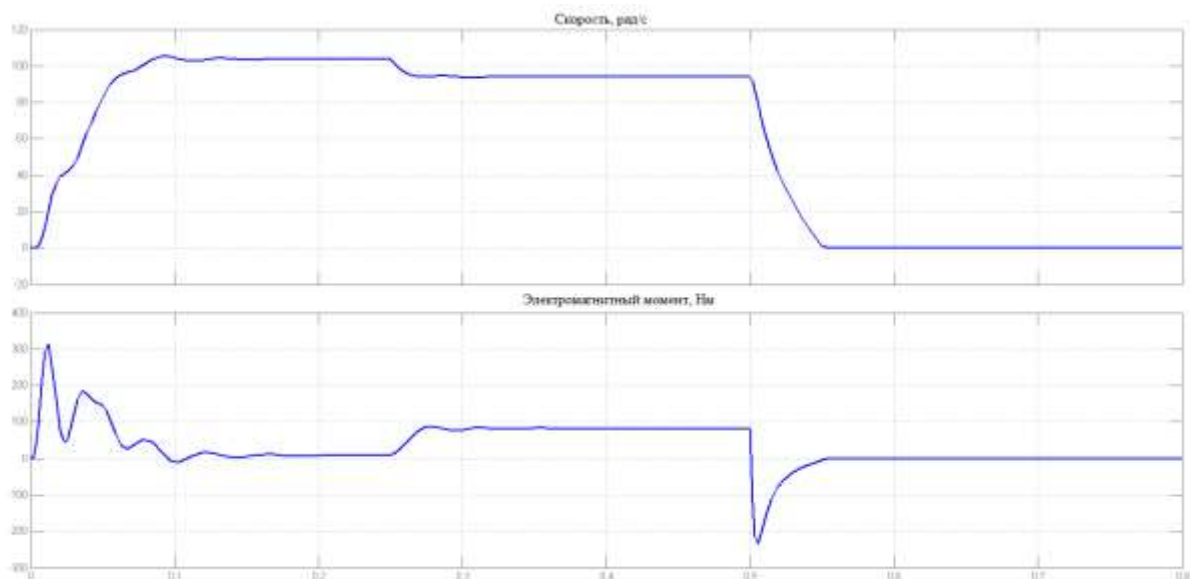


Рисунок 20 - Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$

4.3 Проверка адекватности разработанной модели

асинхронного двигателя

Для проверки адекватности разработанной математической модели на основе модулей библиотеки SimPowerSystem Simulink Matlab собирем имитационную модель асинхронного двигателя изображенную на рисунке 21.

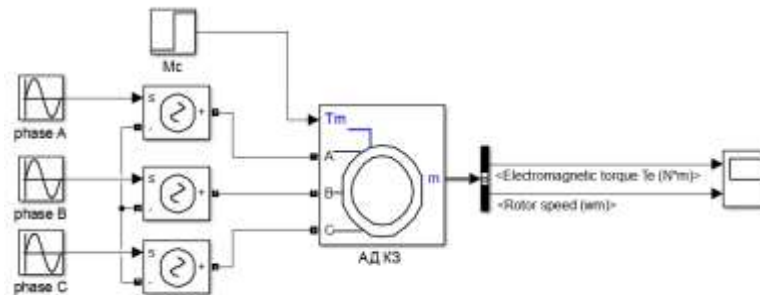


Рисунок 21 – Имитационная модель асинхронного двигателя на основе модулей библиотеки SimPowerSystem.

Динамические характеристики полученные с помощью этой модели представлены на рисунке 22. Характеристики полученные с помощью математической модели представлены на рисунке 23. Двигатель разгоняется без нагрузки, в момент времени 0,25 с. происходит подключение нагрузки $M_H=82,502$ Нм.

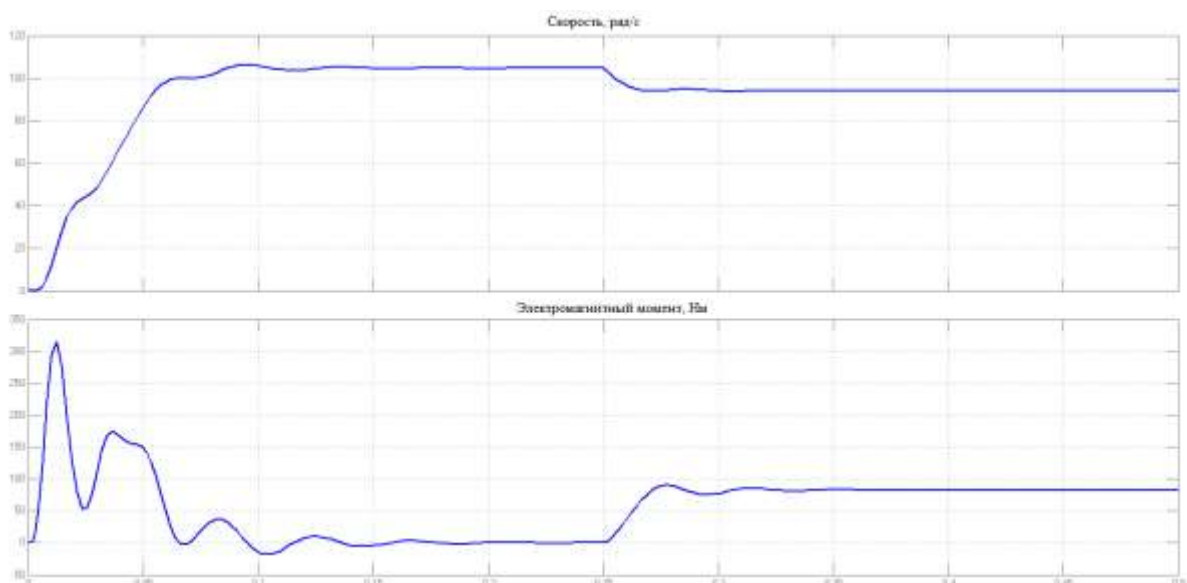


Рисунок 22 – Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$ полученные с помощью библиотечной модели двигателя.

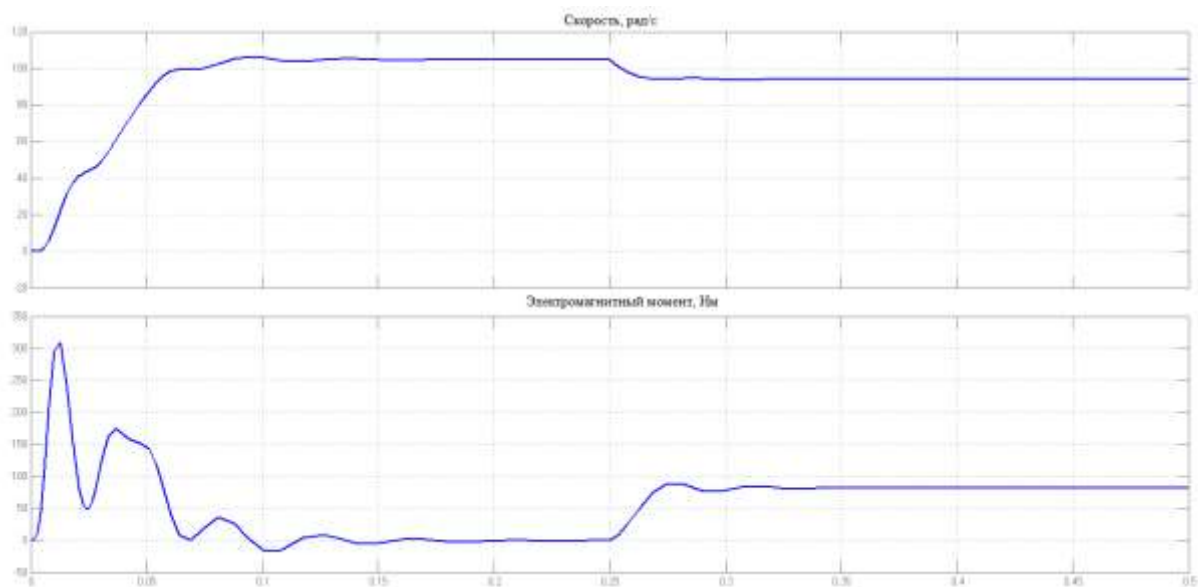


Рисунок 23 – Графики зависимостей $n = f(t)$ и $M = f(t)$, полученные с помощью математической модели двигателя в системе координат d, q

Анализ двух расчётов – с моделью SimPowerSystems и с разработанной по математическому описанию – показывает их полное схождение, что позволяет утверждать о возможности использования разработанной модели в исследованиях электропривода переменного тока.

4.4 Исследование способов управления для электропривода системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

На основании режимов работы и выбора частотного управления асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями механизмов передвижения, рассматривается выборка оптимальных способов их управления.

В частотно-регулируемом электроприводе существуют несколько общеизвестных способов управления: скалярный (U/f регулирование), векторный с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

При изготовлении двигателей неизбежны отклонения параметров обмоток, а при эксплуатации механизма передвижения один двигатель может быть нагружен больше чем другой, что приводит к различию

жесткости механических характеристик двигателей. Для имитации такого случая принудительно нагрузим дополнительно один из асинхронных двигателей (АД КЗ 2).

4.4.1 Скалярное управление

Модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении, состоящая из формирователя напряжения (U/f control), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 24.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при скалярном управлении приведены на рисунке 25.

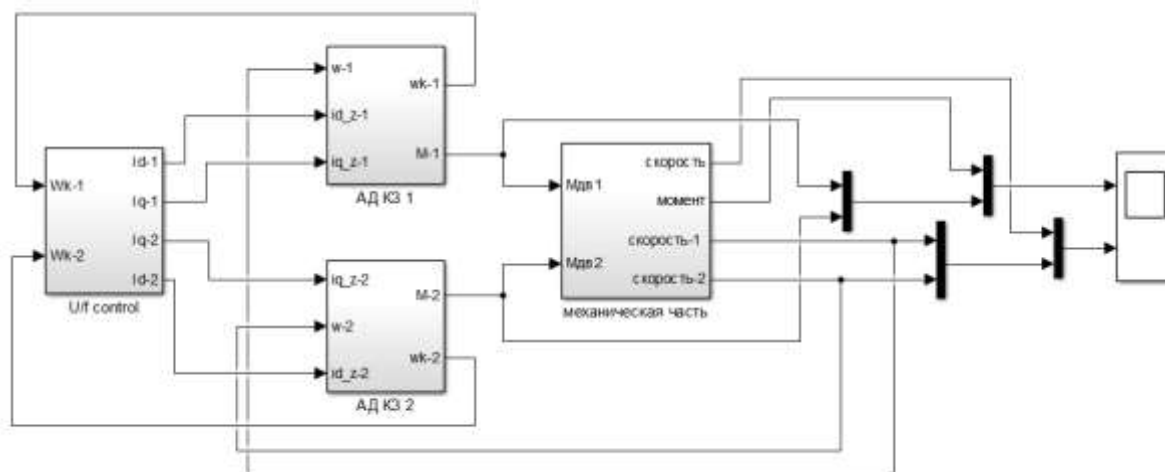


Рисунок 24 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

Определим относительную величину неравномерности синхронизации скоростей двигателей:

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{18,3} \cdot 100\% = 2,73\%. \quad (86)$$

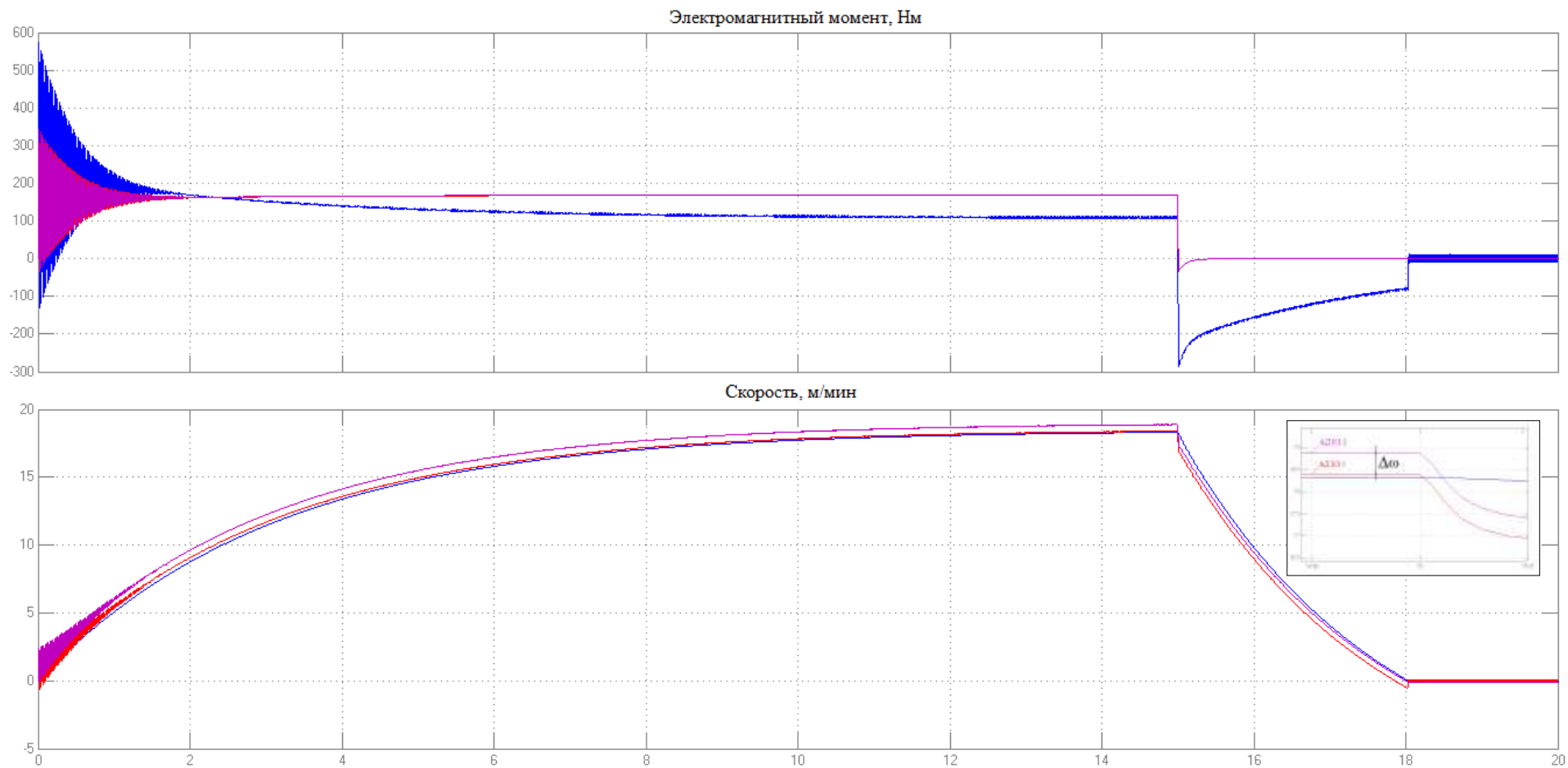


Рисунок 25 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при скалярном управлении

По полученному переходному процессу определим расстояния на которое одна опора опережает другую за 1 секунду.

Для этого найдем расстояние, которое проходит каждая опора за 1 секунду по формуле

$$S_i = \frac{v_i \cdot 1}{60}. \quad (87)$$

Поставляя численные значения в формулу (87) получим

$$S_1 = \frac{v_{\text{дв}1} \cdot 1}{60} = \frac{18,4 \cdot 1}{60} = 0,3067 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{дв}2} \cdot 1}{60} = \frac{18,9 \cdot 1}{60} = 0,3150 \text{ м};$$

Найдем разницу расстояния между опорами

$$S = S_1 - S_2 \quad (88)$$

$$S = 0,3067 - 0,3150 = 0,0083 \text{ м}.$$

При данном способе управления наблюдается постоянное рассогласование скоростей на всем участке работы, а также не соответствие требования к режиму работы (рисунок 6).

4.4.2 Векторное управление с обратной связью по скорости одного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя, состоящая из S-задатчика скорости, общего контура скорости, контуров тока и потокосцепления (для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 26.

Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя приведены на рисунке 27.

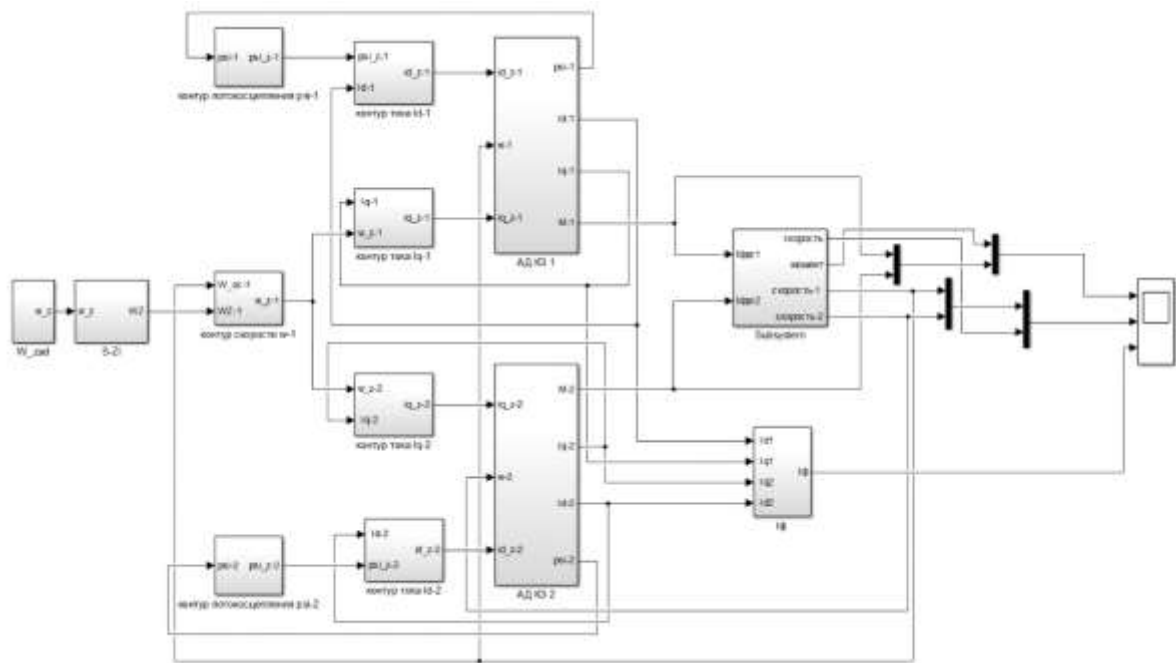


Рисунок 26 – Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя

Определим относительную величину неравномерности синхронизации скоростей двигателей:

При разгоне

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{9,3}{36,4} \cdot 100\% = 25,55\%. \quad (89)$$

При равномерном движении

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{0,95}{66,5} \cdot 100\% = 1,43\%. \quad (90)$$

При торможении

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega_3}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{10,3}{44,2} \cdot 100\% = 23,30\%. \quad (91)$$

По полученному переходному процессу определим расстояния на которое одна опора опережает другую за 1 секунду.

Для этого найдем расстояние, которое проходит каждая опора за 1 секунду по формуле (87), и расстояние между опорами по выражению (88)

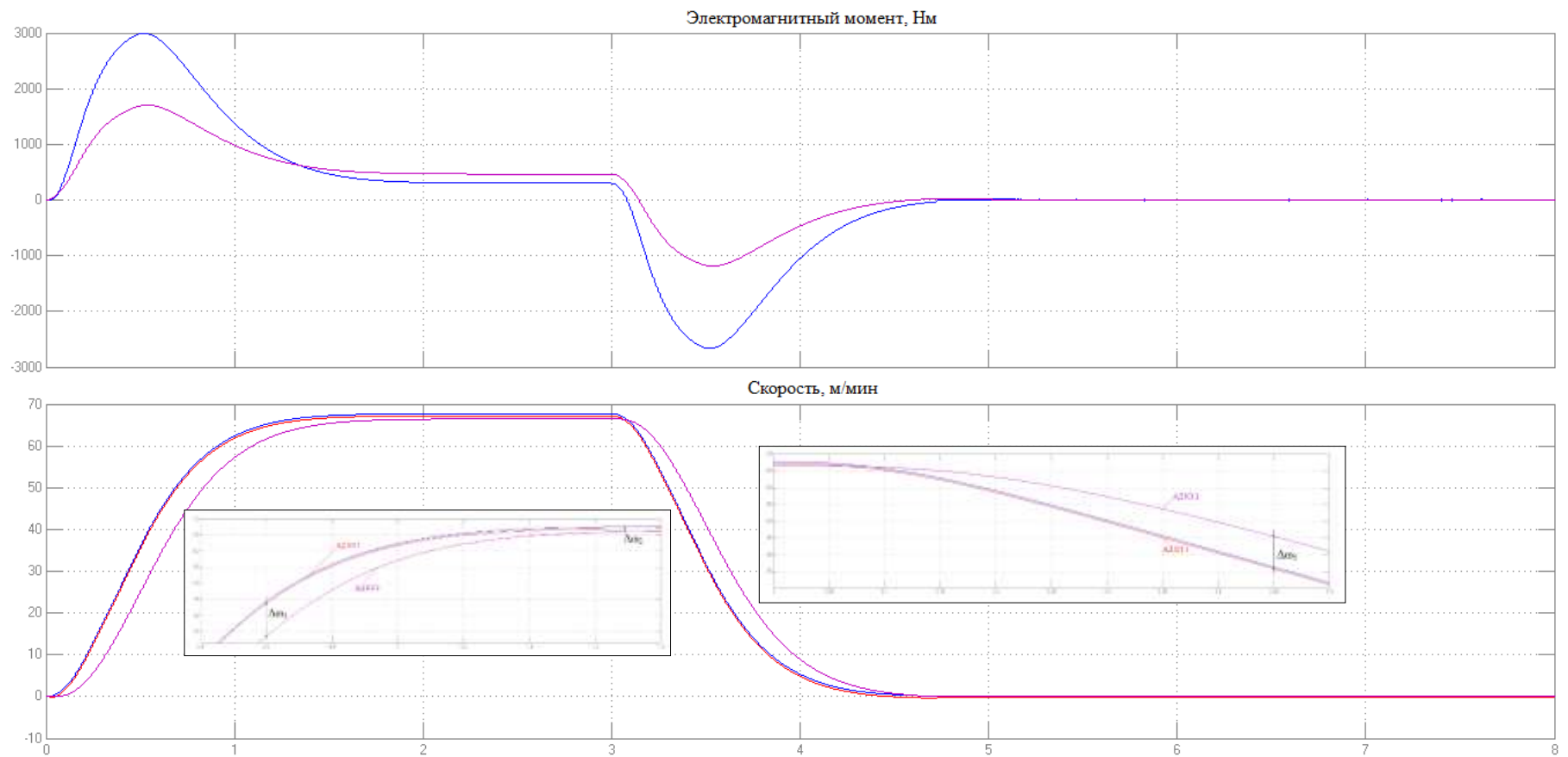


Рисунок 27 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя

При разгоне

$$S_1 = \frac{v_{\text{дв}1} \cdot 1}{60} = \frac{43,8 \cdot 1}{60} = 0,73 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{дв}2} \cdot 1}{60} = \frac{33,5 \cdot 1}{60} = 0,56 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,73 - 0,56 = 0,17 \text{ м}.$$

При равномерном движении

$$S_1 = \frac{v_{\text{дв}1} \cdot 1}{60} = \frac{67,05 \cdot 1}{60} = 1,1175 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{дв}2} \cdot 1}{60} = \frac{66,1 \cdot 1}{60} = 1,1017 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 1,1175 - 1,1017 = 0,0158 \text{ м}.$$

При торможении

$$S_1 = \frac{v_{\text{дв}1} \cdot 1}{60} = \frac{36,1 \cdot 1}{60} = 0,6017 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{\text{дв}2} \cdot 1}{60} = \frac{45,4 \cdot 1}{60} = 0,7567 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,6017 - 0,7567 = 0,155 \text{ м}.$$

Для данного способа управления характерно существенное рассогласование скоростей вращения двигателей, а значит, движение опор, при разгоне и торможении. Режим работы при векторном управлении с обратной связью по скорости одного двигателя соответствует нагрузочной диаграмме (рисунок 6).

4.4.3 Векторное управление с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя

Модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя, состоящая из S-здатчика скорости, контуров скорости, тока и потокосцепления (для каждого двигателя), электромеханических преобразователей (АД КЗ 1 и АД КЗ 2) и механической части представлена на рисунке 28.

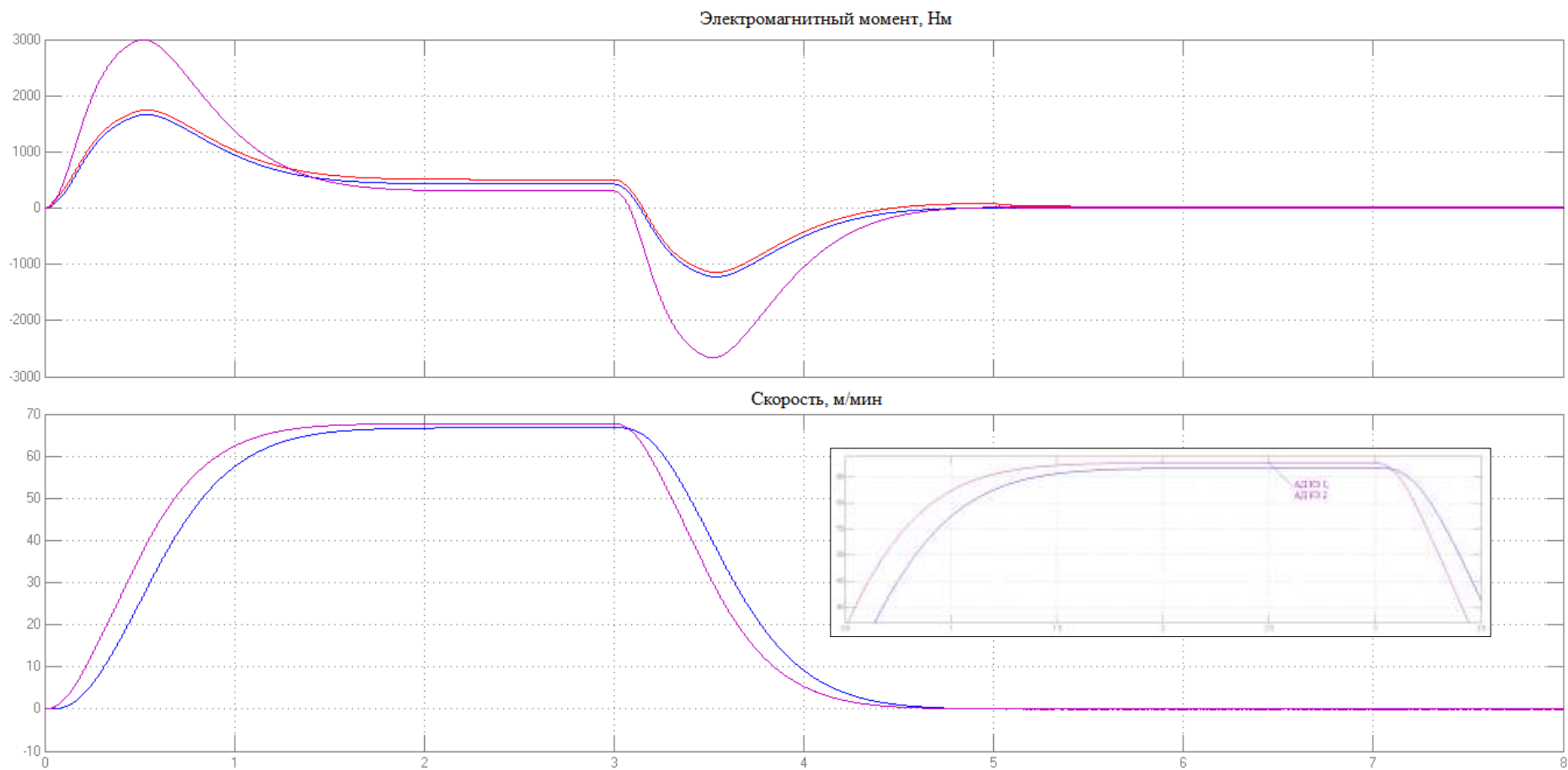


Рисунок 29 - Динамические характеристики $M = f(t)$ и $n = f(t)$ двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя

Выводы по разделу:

1. Разработана на основе системы математических уравнений структурная модель асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q .

2. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной библиотечной модели. В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.

3. Произведено исследование полученных в программе MATLAB переходных процессов момента и скорости асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, согласно структурной модели во вращающейся системе координат d, q . В результате наблюдается устойчивость в режиме пуска и наброса нагрузки через 0,25 секунд до номинальной скорости.

4. Произведен сравнительный анализ трех систем управления двухдвигательным электроприводом: скалярное (U/f регулирование), векторное с обратной связью по скорости одного двигателя и с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя. Следует отметить, что при векторном управлении режим работы двухдвигательного электропривода механизма перемещения козлового крана будет соответствовать рисунку 6, а при скалярном управлении – нет.

5. Заданным требованиям – синхронизация скорости вращения двигателей с целью исключения повреждений конструкции крана – отвечает модель привода векторного управления с обратной связью по скорости каждого асинхронного двигателя.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Исмаилов Анваржон Анарбай угли

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений ИР	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Структура работ; Определение трудоемкости; Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Расчет бюджетной стоимости ИП по разработке стенда
4. Оценка ресурсной эффективности ИР	Расчет интегрального критерия: Интегральный финансовый показатель разработки; Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки; Интегральный показатель эффективности; Сравнительная эффективность вариантов исполнения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности ИР
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Инвестиционный план. Бюджет ИП
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Исмаилов Анваржон Анарбай угли		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время, козловые краны являются одним из основных средств механизации перегрузочных и складских работ в различных отраслях народного хозяйства. Козловые подъемные машины долговечны и эксплуатируются десятки лет. Учитывая их производительность, они приносят хороший доход.

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62. Козловой кран ЛТ-62 обеспечивает непрерывную погрузку и выгрузку в крупных складских терминах, складах, также находит применение на монтаже конструкций.

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. Механизм горизонтального передвижения козлового крана выполняется на основе двухдвигательного электропривода для обеспечения заданных эксплуатационных показателей выполняет все предъявляемые к нему требования и обеспечивает высокую надежность работы оборудования.

Анализ технической целесообразности заключается в выявлении преимуществ и недостатков, с точки зрения повышения технического уровня, в замене однодвигательного электропривода на двухдвигательный электропривод соответствии с техническими условиями.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проведен с помощью оценочной карты.

В рамках данной работы произведем сравнение систем управления двухдвигательным приводом: 1) с обратной связью по скорости каждого двигателя; 2) векторное с обратной связью по скорости одного двигателя; 3) скалярное.

Таблица 5.1 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда	0.05	1	1	1	0.05	0.05	0.05
Синхронизация скорости вращения	0.1	5	4	4	0.5	0.4	0.4
Уровень шума	0.075	4	3	3	0.3	0.225	0.225
Надежность	0.05	4	3	3	0.2	0.15	0.15
Безопасность	0.1	5	3	3	0.5	0.3	0.3
Энергоэкономичность	0.125	4	1	1	0.5	0.125	0.125
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0.1	5	4	4	0.5	0.4	0.4
Уровень проникновения на рынок	0.05	5	5	5	0.25	0.25	0.25

Цена	0.075	5	3	3	0.37 5	0.225	0.225
Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	3	3	3	0.3	0.3	0.3
Послепродажное обслуживание	0.075	4	4	4	0.3	0.3	0.3
Финансирование научной разработки	0.05	4	2	2	0.2	0.1	0.1
Наличие сертификации разработки	0.05	2	1	1	0.1	0.05	0.05
Итого	1	51	37	37	4.07	2.87	2.87

Согласно составленной оценочной карте наиболее конкурентоспособным в данной ситуации является вариант системы управления 1. Изучив их преимущества, делаем вывод о том, что спрос на предоставляемое техническое решение является наиболее оптимальным.[29]

5.1.2 SWOT анализ

Для реализации данного проекта проведем SWOT-анализ, который позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также определить возможности проекта и угрозы.

SWOT-анализ представлен в табличной форме 4.2.

Таблица 5.2 - Матрицы SWOT

	<p>Сильные стороны проекта: С1: Отсутствие необходимости более чем двух участников проекта С2: Универсальность разработки С3: Возможность разработки имитационной модели без применения сложного дорогостоящего оборудования С4: Нет необходимости в реальных опытных образцах С5: Знания участников проекта в данной области</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1: Сложность системы Сл2: Работоспособность системы зависит от множества параметров Сл3: Не проработаны пути продвижения на рынок Сл4: Повышение стоимости материалов</p>
--	---	---

<p>Возможности проекта: В1: Разработка позволит достичь лучшего качества выдаваемого материала В2: Внедрение данной разработки в производство В3: Повышение надежности узлов и агрегатов В4: Использование полученных знаний в дальнейших исследованиях</p>	<p>В1В2С1С3: возможность внедрения новых технологий без дополнительных затрат при помощи создания имитационных моделей В3В4С2С5: возможность расширения области применения разработки</p>	<p>В2В3Сл1Сл2: требуется дополнительные затраты на повышение квалификации персонала эксплуатирующей организации</p>
<p>Угрозы проекта: У1: Развитая конкуренция, появление более надежных агрегатов У2: Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции. У3: Отсутствие спроса данной разработки</p>	<p>У3С2С3С5: внедрение разработки в другие сферы народного хозяйства У1У2С3С5: оптимизировать работу коллектива что снизит время на выполнение работ. При этом за счет опытного научного руководителя качество проводимых исследований останется высокой.</p>	<p>У1Сл3Сл4: использовать рекламу</p>

В ходе анализа были изучены сильные стороны и возможности проекта, а также обозначены его слабые стороны и угрозы, которые необходимо учесть при реализации проекта.

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
			Инженер
	3	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель
	4	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические исследования	5	Обзор технических характеристик и назначение козлового крана, требования предъявляемые к приводу передвижения	Инженер
Расчеты и моделирование	6	Выбор оборудования и расчет, выбор преобразователя, оптимизация контуров регулирования, разработка имитационной модели	Инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ возможных вариантов исполнения устройства и компьютерное моделирование	Руководитель
			Инженер
Контроль и координирование проекта	8	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	8	Разработка принципиальной схемы	Инженер
	10	Технико-экономические расчеты	Инженер
	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{max}i}}{5},$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \text{ где } T_{pi} \text{ – продолжительность одной работы, рабочие дни;}$$

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

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

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

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

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

Таблица 5.4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}		Длительность работ в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение задания	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	3	-
Выбор направления исследований	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Календарное планирование работ по проекту	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	5
Обзор технических характеристик и назначение козлового крана	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	5
Выбор оборудования, преобразователя, оптимизация контуров регулирования, разработка имитационной модели	-	4	-	5	-	4,4	-	4,4	-	7
Анализ возможных вариантов исполнения устройства и компьютерное моделирование	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Разработка принципиальной схемы	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
Технико-экономические расчеты	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Диаграмма Ганта



Таблица 5.6 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	36
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	31
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	10

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

5.2.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

5.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

В данном разделе будет составлен бюджет проекта, который учитывает все расходы, которые будут затрачены при выполнении проекта.

Таблица 5.7 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Ручка шариковая	46	4	184
Карандаш	30	4	120
Тетрадь	25	2	50
Бумага офисная «Снегурочка» 500 листов	286	1	286
Картридж для принтера	2600	1	2600
Итого:			3240

Цены приняты на основании прайс-листа поставщика материалов:
<https://www.kantsler.ru/index.php?ukey=home>

5.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 5.8 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Двигатель АМТКФ132L6	2	10	0,33	0,1	62432	171,68	
2	Редуктор 1Ц2У-200-25-12	2	5	0,33	0,07	55200	303,6	
3	Коммутационная аппаратура	2	10	0,33	0,07	30360	83,49	
4	Преобразователь частоты	2	10	0,33	0,1	57196	157,29	
5	Ноутбук с ПО	1	3	1,18	0,33	36500	1196,4	
Итого:								1912,4 руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Рассчитаем норму амортизации для двигателя АМТКФ132L6, с учётом того, что срок полезного использования составляет 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 62432}{12} \cdot 0,33 = 171,68 \text{ руб.}$$

5.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{осн} \cdot T_p,$$

где $Z_{осн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{осн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_o} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; F_o – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{осн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_o} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}.$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_o – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 5.9 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 5.10 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_{р}, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	10	21473
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	31	54036,1
Итого:								75509,1

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 21473 = 3220,9 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 54036,1 = 8105,4 \text{ руб.},$$

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

5.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (21473 + 3220,95) = 7408,2 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (54036,1 + 8105,4) = 18642,5 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

5.2.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 5.11 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
1912,4	3240	75509,1	11326,3	26050,7	118038,5

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр},$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет по форме, приведенной в таблице 5.12. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 5.12 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущи й Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	3240	3240	3240	Пункт 4.2.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	1912,4	1914,5	2093,2	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	75509,1	75509,1	75509,1	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11326,3	11326,3	11326,3	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	26050,7	26050,7	26050,7	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	23607,7	23616,3	2368,2	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		118038,5	118081,7	118341	Сумма ст. 1- 6

5.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов

исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 118038,5$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 118081,7$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 118341$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118038,5}{118341} = 0,996;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118081,7}{118341} = 0,997;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.3}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118341}{118341} = 1.$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности. Столь малое отличие значений интегрального показателя разработки обусловлено малым сроком использования оборудования (для снятия характеристик и настройки регуляторов).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{ri}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 5.13).

Таблица 5.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка базового варианта	Бальная оценка аналога 1	Бальная оценка аналога 2
1. Надежность	0,2	4	4	5
2. Стабильность работы	0,2	5	5	4
3. Обеспечение заданных параметров работы	0,3	5	3	2
4. Ремонтпригодность	0,15	5	4	4
5. Простота эксплуатации	0,15	4	4	5
Итого:	1	4,65	3,9	3,75

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,65;$$

$$I_{p2} = 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,9;$$

$$I_{p3} = 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 2 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 3,75.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}}.$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,996} = 4,67; \quad I_{исп.2} = \frac{3,9}{0,997} = 3,91; \quad I_{исп.3} = \frac{3,75}{1} = 3,75.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других

вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 5.14).

Таблица 5.14 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,996	0,997	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,9	3,75
3	Интегральный показатель эффективности	4,67	3,91	3,75
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,83	0,8

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 36 дней; общее количество дней, в течение

которых работал инженер, составляет 31 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 10 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 118038,5руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,90, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 3,9 и 3,75;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,67, по сравнению с 3,91 и 3,75, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 3-5Г5А1		ФИО Исмаилов Анваржон Анарбай угли	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетики и электротехники

Тема ВКР:

Асинхронный электропривод механизма передвижения козлового крана	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования является электропривод механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62. Применяются в различных отраслях промышленности для подъема и транспортировки тяжеловесных грузов.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	1) ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности; 2) N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» 3) N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» 4) ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<i>Вредные факторы при эксплуатации электропривода грузоподъемных машин, в основном, связаны:</i> - с повышением уровня шума, - с повышением уровня вибрации, - с превышением электромагнитных излучений, - с отклонением показателей климата на открытом воздухе. <i>Опасности при эксплуатации грузоподъемных машин, в основном, связаны:</i> - с электрическим током, - с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования, - с возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза, - с высыпанием части груза, - с падением грузоподъемных машин, - с наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами
3. Экологическая безопасность:	- Бытовые отходы. Отходы, образующиеся при поломке элементов электропривода.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС техногенного характера: - пожар - взрыв Типичная ЧС: пожар.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Исмаилов Анваржон Анарбай угли		

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность – ответственность организации за воздействия её решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое: содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества; учитывает ожидания заинтересованных сторон; соответствует применяемому на данный момент законодательству и согласуется с международными нормами поведения; интегрировано в деятельность организации и применяется в ее взаимоотношениях.

Данный раздел работы будет посвящен выявлению, рассмотрению и анализу воздействующих факторов при эксплуатации электропривода механизма перемещения грузоподъемных машин ЛТ-62.

Подъемно-транспортные механизмы, представляют собой большую группу механизмов общепромышленного назначения, выполняющих разнообразные погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся краны - мостовые, козловые, башенные, поворотные и т.д. Среди этих механизмов в наиболее тяжелых условиях и интенсивных режимах работают козловые краны.

Козловые краны оснащены системами двухдвигательного электропривода. В их числе привода, обеспечивающие горизонтальное передвижение самого крана. Таковыми являются механизмы передвижения.

Привода устанавливаются у основания стоек, представляющих собой несущую часть крана. Основным требованием к данному механизму является согласованное передвижение опор козлового крана при одинаковой скорости вращения электроприводов. Поэтому, на основе данного требования, необходимо применение специальной системы согласования приводов. Механизмы передвижения являются единственными, где необходима система согласования или синхронизации.

В дипломном проекте производится выбор электродвигателя и преобразователя частоты, расчет параметров схемы замещения и получение электромеханических характеристик электродвигателя.

Так же разработается модель в программной среде Simulink Matlab, позволяющую имитировать двухдвигательный электропривод механизма передвижения козлового крана, включая два преобразователя частоты, два двигателя, реактивную нагрузку, контура обратных связей.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Для осуществления практической деятельности в области обеспечения безопасности жизнедеятельности необходимо соблюдение нормативов и правил ведения соответствующих работ, позволяющие их обеспечить.

В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более 2 часов и не менее 30 минут, которые не включаются в рабочее время. Время предоставления перерыва и его конкретная продолжительность устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка организации или по соглашению между работником и работодателем. На работах, где по условиям производства (работы) предоставление перерыва для отдыха и питания невозможно, работодатель обязан обеспечить работнику возможность отдыха и приема пищи в рабочее время. Перечень таких работ, а также места для отдыха и приема пищи устанавливаются правилами внутреннего трудового распорядка организации (ст. 108 ТК РФ) [1]. Для управления грузоподъемными кранами могут назначаться рабочие не моложе 18 лет, прошедшие обучение по соответствующей программе, аттестованные

квалификационной комиссией при участии представителя местного органа Госпромнадзора и получившие удостоверение установленной формы.

Перед допуском к самостоятельной работе машинист крана должен пройти стажировку в течение 2-14 смен под руководством опытного машиниста, назначенного приказом по предприятию.

Машинисты, допущенные к управлению кранов мостового типа должны иметь группу по электробезопасности не ниже II. [2].

Конструкция кабины должна обеспечивать защиту оператора крана (крановщика) от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды. Внутренние размеры кабины должны быть не менее: высота - 2000 мм, ширина - 900 мм, длина - 1300 мм. В кабинах с невертикальной передней частью в сечении, проходящем через индексную точку сиденья оператора крана (крановщика) (SIP), допускается уменьшение высоты до 1600 мм. Высота кабины грузовых тележек, передвигающихся по надземному крановому пути и предназначенных для работы сидя, может быть уменьшена до 1600 мм. В кабине должен быть обеспечен свободный доступ к расположенному в ней оборудованию. Вход в кабину должен осуществляться через дверь. Дверь должна быть снабжена устройствами фиксации в закрытом и открытом положениях. Пол, внутреннее пространство, обшивка и изоляция кабины должны быть изготовлены из материалов, замедляющих горение. Скорость распространения огня не должна превышать 150 мм/мин. Кабина должна быть оборудована стационарным, прочно закрепленным сиденьем для оператора крана (крановщика). Покрытия сидений должны быть изготовлены из воздухопроницаемого, моющегося нетоксичного материала. Индикаторы и дисплеи с важной оперативной информацией должны быть хорошо видны и удобно располагаться по отношению к оператору.

6.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при эксплуатации козлового крана.

При эксплуатации козлового крана возможно воздействие на человека следующих опасных производственных факторов:

- поражения электрическим током
- с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования,
- с возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза,
- с высыпанием части груза,
- с падением грузоподъемных машин,
- с наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами.

Вредные факторы при эксплуатации электропривода грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с повышением уровня шума;
- с повышением уровня вибрации;
- с превышением уровня электромагнитных излучений;
- с отклонением показателей климата на открытом воздухе.

Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды необходимо представить в виде таблицы 6.1.

Таблица 6.1 - Опасные и вредные факторы при эксплуатации козлового крана.

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Козловой кран ЛТ-62	<p>1. Повышенный уровень шума на рабочем месте [3];</p> <p>2. Повышенный уровень вибрации [4]</p> <p>3. Отклонения параметров климата на открытом воздухе [5];</p> <p>4. Превышение уровня электромагнитных излучений [6]</p>	<p>1. Поражение электрическим током [8], [9]</p> <p>2. С непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования [10]</p> <p>3. С возможными ударами от падающих предметов при обрыве поднимаемого груза [10]</p> <p>4. С высыпанием части груза [10]</p> <p>5. С падением грузоподъемных машин,</p> <p>6. С наездом и ударами при столкновении с передвижными грузоподъемными машинами [10]</p>	<p>СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [3]</p> <p>СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [4]</p> <p>ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ [5]</p> <p>ГОСТ 12.1.002-84 [6]</p> <p>ГОСТ 12.3.009-76 [10]</p> <p>ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ [8]</p> <p>ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ [9]</p>

6.2.1 Анализ вредных производственных факторов

Повышенный уровень шума на рабочем месте

Из наиболее распространенных в производстве вредных факторов являются шум. В данной работе следует выделить следующие группы источников:

- шум механического происхождения, возникающий при вибрации поверхностей оборудования, а также при одинарных или периодических ударах в соединениях деталей и или конструкциях;
- шум электромагнитного происхождения, возникающий вследствие колебаний электрических устройств (ротора, статора) под действием переменных магнитных полей.

Шум и вибрация вызывают головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижается реакция. В таблице 6.2 указаны допустимые уровни звукового давления, превышение которых не допускается при выполнении основной работы [3]

Таблица 6.2 - Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот.

Рабочее место	Уровни звукового давления дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постоянные рабочие места	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Мерой по защите персонала от повышенного уровня шума является разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты и средств индивидуальной защиты [7].

6.2.2 Повышенный уровень вибрации на рабочем месте

Источником вибрации является работающий электромашинный агрегат. По [4] уровень вибрации не должен превышать 88 дБ. Мерой по защите персонала от повышенного уровня вибрации является ограничение контакта работника с вибрацией.

6.2.3 Отклонения параметров климата на открытом воздухе

В дипломной работе рассматривается электропривод механизма перемещения козлового крана ЛТ-62, установленного на открытой территории.

В рабочей зоне осуществляется естественная вентиляция. Основным недостатком - воздух не подвержен предварительной очистке и нагреванию.

Влияние климата на самочувствие человека значимо и существенно, а переносимость температуры во многом зависит от скорости движения и влажности окружающего воздуха.

При длительном пребывании человека в условиях высокой температуры повышаются температура тела, частота сердечных сокращений изменяется, повышается или снижается артериальное давление, нарушаются обменные процессы, особенно водно-солевой, функциональное состояние органов желудочно-кишечного тракта. Одновременно значительно снижается умственная и физическая работоспособность.

Длительное воздействие относительно низких температур воздуха или кратковременные воздействия особенно низких температур вызывают значительные нарушения функционального состояния. Физические нагрузки при пониженных температурах вызывают ухудшение эластичности и сократительной способности мышц и связок, что является одной из причин травматических повреждений опорно-двигательного аппарата.

Человек будет чувствовать себя абсолютно комфортно, если влажность окружающего его воздуха будет колебаться в пределах от 40 до 60%. Это и есть нормальная влажность воздуха. В случаях снижения влажности ниже 40%,

практически все здоровые люди начинают испытывать сонливость, рассеянность, ощущать чувство сухости кожи и раздражение слизистых оболочек.

По ГОСТ 12.1.005 – 88 оптимальная норма относительной влажности воздуха в рабочих местах при тяжелых категориях работ составляет 40-60 %. Допустимая норма относительной влажности воздуха при тяжелых категориях работ в холодный период года не более 75%, в теплый период года не более 65% (при 260С) [5]. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата для машиниста крана представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата для машиниста крана

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат(ккал/ч)	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая
Холодный	III	16-18	13-19	40-60	<75	0,3	<0,5
Теплый	III	18-20	13-26	40-60	<75(при 24°С и ниже	0,4	0,2-0,6

Для защиты от повышенной влажности воздуха в козловых кранах предусмотрена система вентиляции - она может быть, как естественной, так и принудительной.

6.2.4 Превышение уровня электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений являются системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии постоянного и переменного тока.: кабели электропитания, электропроводка, выпрямители и преобразователи тока. Величина электромагнитных полей

нормируется согласно [6]. Допустимые нормы напряженности магнитных полей представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Предельно допустимые уровни напряжённости периодического магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания (час)	Допустимые уровни МП, Н [А/м] / В [мкТл]	
	Общее воздействие	Локальное воздействие
< 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Для территорий, где установлено электрооборудование, согласно [16] установлены нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля промышленной частоты. Данные нормы приведены ниже:

- При $E \geq 25$ кВ/м – пребывание в электрическом поле без средств защиты не допускается;
- При $20 < E < 25$ кВ/м – пребывание в электрическом поле не более 10 минут;
- При $5 < E < 20$ кВ/м – допустимое время пребывания в электрическом поле вычисляют по формуле: $T=(50/E)-2$, часов;
- При $E \leq 5$ кВ/м – пребывание в электрическом поле подпускается в течение полного рабочего дня.

Обеспечение защиты рабочих от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей осуществляется еще путем проведения организационных и технических мероприятий.

К организационным мероприятиям относятся мероприятия, обеспечивающие соблюдение требований ограничения продолжительности пребывания возле электроустановок, организация рабочих мест на расстоянии от токоведущих частей. К техническим мероприятиям относится экранирование источников электромагнитных полей.

Анализ опасных производственных факторов

Опасности при эксплуатации грузоподъемных машин, в основном, связаны:

- с электрическим током [8, 9],
- с непреднамеренным контактом человека с движущимися частями оборудования [10]

К опасным факторам можно отнести наличие большого количества аппаратуры, использующей электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности поражения людей электрическим током козловой кран можно отнести к объекту с повышенной опасностью, который характеризуется наличием следующих условий: возможности одновременного прикосновения человека к соединенным с землей металлическим частям зданий, технологических аппаратов, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой. [8]

Во время нормального режима работы оборудования опасность поражения крайне мала, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением;

- нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;
- несогласованные и ошибочные действия персонала (подача напряжения на установку, где работают люди; оставление установки под напряжением без надзора; допуск к работам на отключенном электрооборудовании без проверки отсутствия напряжения и т.д.).

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:

- изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

К опасным факторам также относятся движущиеся части машин и механизмов. В качестве механических опасностей обозначаются все физические факторы, которые могут привести к травмам от механического движения деталей машины. Основными видами механических опасностей являются: прижатие или раздавливание; порезы; разрезание или разрубание; защемление или наматывание; втягивание; попадание под удар; поверхностное повреждение или существенное сдирание наружных тканей под действием трения.

Средствами защиты могут служить:

1. Обеспечение недоступности опасной зоны;
 2. Уменьшение опасности при помощи специальных приспособлений к которым относятся:
- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, щиты, барьеры и т. д.);
 - предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);

- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);

- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами [10].

Опасными факторами также являются:

- опасность опрокидывания крана – возникает при потере краном равновесия, что может повлечь за собой человеческие жертвы, разрушение сооружений и технических устройств. На устойчивость крана влияет также устройство площадок выполнения грузоподъёмных работ. Строгое соблюдение всех норм, определённых в регламенте проведения погрузочно-разгрузочных работ позволяет обеспечивать безопасность опрокидывания крана.

- опасность падения груза - является одной из самых распространённых опасностей при эксплуатации грузоподъёмных машин. Чаще всего эта опасность связана с неправильной строповкой груза, разрывом канатов и неисправности грузозахватных механизмов. Для обеспечения безопасности следует проводить обследование крана и устройств для проведения работ, соблюдать правила строповки и эксплуатации кранов, соблюдать технику безопасности.

6.3 Экологическая безопасность

В данной главе работы рассмотрим следующие вопросы экологической безопасности, а именно произведем анализ воздействий козлового крана на атмосферу, гидросферу и литосферу в процессе эксплуатации. Разработаем решения по обеспечению экологической безопасности.

Анализ воздействия на атмосферу

Рабочий механизм содержит огромное количество компонентов, которые содержат вредные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец ($0,05 \text{ мг/м}^3$) (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- никель ($0,05 \text{ мг/м}^3$) и цинк ($1,5-0,5 \text{ мг/м}^3$) (могут вызывать дерматит);
- щелочи ($0,5 \text{ мг/м}^3$) (прожигают слизистые оболочки и кожу)

Согласно [11] предельно допустимая концентрация веществ, используемых при эксплуатации не должна превышать установленных значений.

Анализ воздействия на гидросферу

В процессе эксплуатации козлового крана выделяются продукты износа, имеют место утечки смазочных материалов. Также недопустимо:

— сток нечистот с рабочей зоны крана и территории эксплуатационных баз в реки и водоемы без предварительного прохождения их через очистные сооружения;

— попадание топливосмазочных материалов и рабочей жидкости на почву при заправке и смазывании кранов.

В случае повреждения узлов и агрегатов, которые могут вызвать загрязнение вод, необходимо оградить место аварии, и обеспечить его охрану, покрыть абсорбционными материалами разлитые и рассыпанные вещества, прекратить отбор подземных вод хозяйственно-питьевого водоснабжения в зоне аварии, собрать, нейтрализовать или уничтожить разлитые, или рассыпанные вещества и ликвидировать последствия аварии и повреждения.

[12]

Анализ воздействия объекта на литосферу

Козловые краны в процессе эксплуатации подвергаются ремонту, модернизации. Вышедшие из строя узлы и агрегаты козлового крана подвергаются утилизации и переработки. Асинхронный двигатель требует специальных комплексных методов утилизации в которых входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части подвергаются специально переработке.

В настоящее время для отходов установлено 5 классов опасности согласно приказу Министерства природных ресурсов Российской Федерации и экологии от 04.12.2014 №536 «Об учреждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду».

Согласно [13] узлы асинхронного двигателя относятся к III классу опасности (умеренно опасные). Данный класс отходов может быть вывезен на свалку бытовых отходов

В настоящее время ведется создания и внедрения безотходной технологии в ряде отраслей промышленности, однако полный перевод ведущих отраслей промышленности на безотходную технологию потребует решения большого комплекса весьма сложных технологических, конструкторских и организационных задач.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Рабочий механизм, который рассматривается в работе, имеет электропроводку напряжением 220 вольт, предназначенную для питания электродвигателя. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком

замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

Данное рабочее место относится к категории ДН (установка относится к категории ДН, если в ней присутствуют (хранятся, перерабатываются, транспортируются) в основном негорючие вещества и (или) материалы в холодном состоянии и, если по перечисленным выше критериям она не относится к категории АН, БН, ВН или ГН). [16 таблица 2]

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов. [14] Организационные мероприятия:

1. Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
2. Обучение персонала правилам техники безопасности;
3. Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1. Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
2. Обеспечение свободного подхода к оборудованию;
3. Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

Выводы по разделу

В разделе «Социальная ответственность» проанализированы и определены вредные и опасные факторы среды, рассмотрены меры и мероприятия по снижению воздействия на лиц, эксплуатирующий козловой кран. В ходе работы проанализированы негативные воздействия на окружающую среду, рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации при работе в процессе эксплуатации привода козлового крана. Помимо этого, были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. На основании полученных данных можно дать рекомендации по ограничению и исключению действия вредных факторов на лиц, эксплуатирующих козловые краны путем обязательного применения индивидуальных средств защиты. Для исключения воздействия опасных факторов необходимо оснастить рабочее место оператора предохранительными блокировочными устройствами, следить за целостностью постоянных ограждений.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе был разработан частотно-регулируемый асинхронный двухдвигательный электропривод механизма передвижения крана козлового, с реализацией синхронизации скорости движения опор.

В процессе проектирования были изучены вопросы назначения крана его характеристики технические его схема кинематическая, так же особенности козлового крана ЛТ-62. На основании данных была рассчитана нагрузка и выбран двигатель асинхронный АМТКФ132М6 мощностью которого равна 7,5 кВт и частотный преобразователь Schneider Electric Altivar 71. Рассчитаны параметры схемы замещения двигателя и получены его характеристики статические.

С помощью программы Matlab на основании модели математической двухфазной в неподвижной системе координат d, q была разработана модель имитационная двухдвигательного электропривода частотно-регулируемого, которая включает в себя S-образный задатчик интенсивности, контура тока, скорости и потокосцепления, механическую часть и два двигателя.

С использованием модели были проведены всесторонние исследования электропривода двухдвигательного, в результате исследований было установлено, что синхронизацию скорости вращения этих двух двигателей обеспечивает векторное управление с обратными связями по скорости по каждому электродвигателю.

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.

В разделе «Социальная ответственность» проанализированы и определены вредные и опасные факторы среды, воздействия негативные на среду окружающую, чрезвычайные ситуации при работе в процессе эксплуатации привода козлового крана.

Conclusion

In this graduation qualification work, a frequency-controlled asynchronous two-motor electric drive of the movement mechanism of the goat crane was developed, with the implementation of synchronization of the speed of movement of the supports.

During the design, the issues of the crane designation its technical characteristics kinematic scheme, as well as features of the JIT-62 goat crane were studied. Based on the data, the load was calculated and an asynchronous motor was selected AMTKF132M6 a power of 7.5 kW and a Schneider Electric Altivar 71 frequency converter. Parameters of engine replacement circuit are calculated and its characteristics are static.

With the help of the Matlab program on the basis of the model of mathematical two-phase in the fixed coordinate system d, q , the model of simulation two-engine electric drive frequency-adjustable was developed, which includes an S-shaped setter of intensity, current contour, speed and flux-coupling, mechanical part and two motors.

Using the model, comprehensive studies of the electric drive of the two-motor were carried out, as a result of studies it was found that synchronization of the rotation speed of these two motors provides vector control with reverse connections by speed for each electric motor.

In the section "Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving," a technical project was carried out and the following tasks were solved:

- As a result of SWOT-analysis, strengths and weaknesses of technical design selection were revealed. It has been found that the technical design has several important advantages, ensuring increased productivity and safety of technical production efficiency.

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

- Preparation of the technical project estimate allowed to estimate the initial amount of costs for the technical project implementation.

- Evaluation of project resource efficiency, carried out by integral indicator.

The section "Social responsibility" analyses and identifies harmful and dangerous environmental factors, negative environmental impacts, emergency situations during operation of the goat crane drive.

Список используемой литературы

1. Байбутанов Б.К. Многодвигательный асинхронный электропривод согласованного вращения: Магистерская диссертация. – Алматы; 2013.
2. Теличко Л.Я. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем группы общепромышленных механизмов на металлургических предприятиях: Дисс.докт.техн.наук. – М.; 2006.
3. Теличко Л.Я., Корчагин А.А. Разработка и исследование оптимальной системы двухдвигательного электропривода механизма опрокидывания: Дисс.докт.техн.наук. – Л.; 2011.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kadrovik.ru/docs/pgosgortehnadSORa31.12.99n98.htm>. – Загл. с экрана.
5. Лой В.Н., Протас П.А., Завойских Г.И. Лесоскладское грузоподъемное оборудование: учеб.метод. пособие для студентов. – Мн.: БГТУ, 2005. – 102 с.
6. Коломинова М. В. Грузоподъемное оборудование для нижнескладских работ: МУ к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Технологические процессы и оборудование лесозаготовительного производства» /М. В. Коломинова. – У.: УГТУ, 2013. – 54 с.
7. Иванченко Ф. К., Красношапка В. А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
8. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 12, февраль 2009.
9. Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов и др./Курсовое проектирование грузоподъемных машин. Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов; Под ред. Казака С.А. – М.: Высшая школа, 1989. - 319 с.: ил.

10. Приводы машин: справочник / Длоугий В.В., Муха Т.И., Цупиков А.П., Януш Б.В.; под общ. ред. Длоугого В.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1982. – 383 с.
11. Крановые электродвигатели серии ДМТ и АМТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.escomotors.ru/sites/default/files/kr_eldv.pdf. – Загл. с экрана.
12. Электрический привод: учебно-методическое пособие / Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 157 с.
13. Преобразователи частоты Altivar 71. Каталог 09 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tesli.com/file/catalogue/schneider-electric/schneider-electric-altivar-71.pdf> – Загл. с экрана.
14. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 164 с.
15. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
16. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В.. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Механическая система электропривода: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
17. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Технико-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.

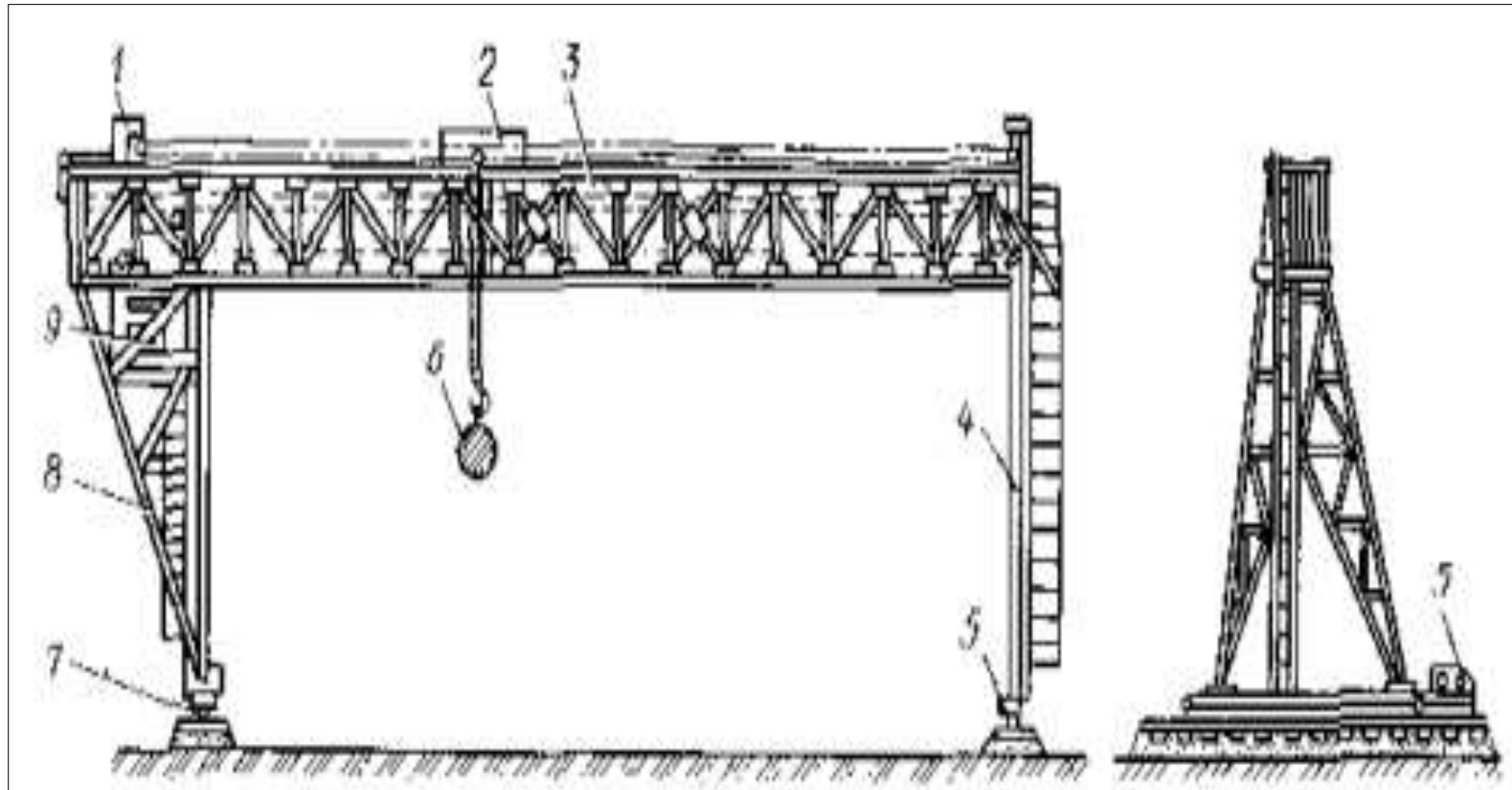
18. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. Экономика предприятия и отрасли (в электроэнергетике): учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
19. Непомнящий Е.Г. Инвестиционное проектирование: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.
20. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утверждено Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ № ВК 477 от 21.06.1999 г. [Электронный ресурс]. - Режим доступа. - <http://www.cfin.ru/>
21. Трудовой кодекс. – М.: Проспект, 2014. – 112 с.
22. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.
23. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.
24. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
25. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. 2014г.
26. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
27. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991.
28. ГОСТ 12.2.003-91 – 92. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
29. ГОСТ 12.3.009-76 – 77 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования.
30. ГОСТ 12.4.026-76 – 78. Света сигнальные и знаки безопасности. Общие требования безопасности.

31. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
32. ГОСТ 12.1.012 –90 ССБТ Вибрационная болезнь. Общие требования.
33. ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
34. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
35. Р 2.2.2006 – 05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Минздрав России, 2006.
36. СНиП 3.05.06-85 – 88. Электротехнические устройства.
37. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.
38. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.
39. СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Минздрав России, 2003.
40. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
41. СН 2.2.4/2.1.8.566. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 1997.

Приложение А

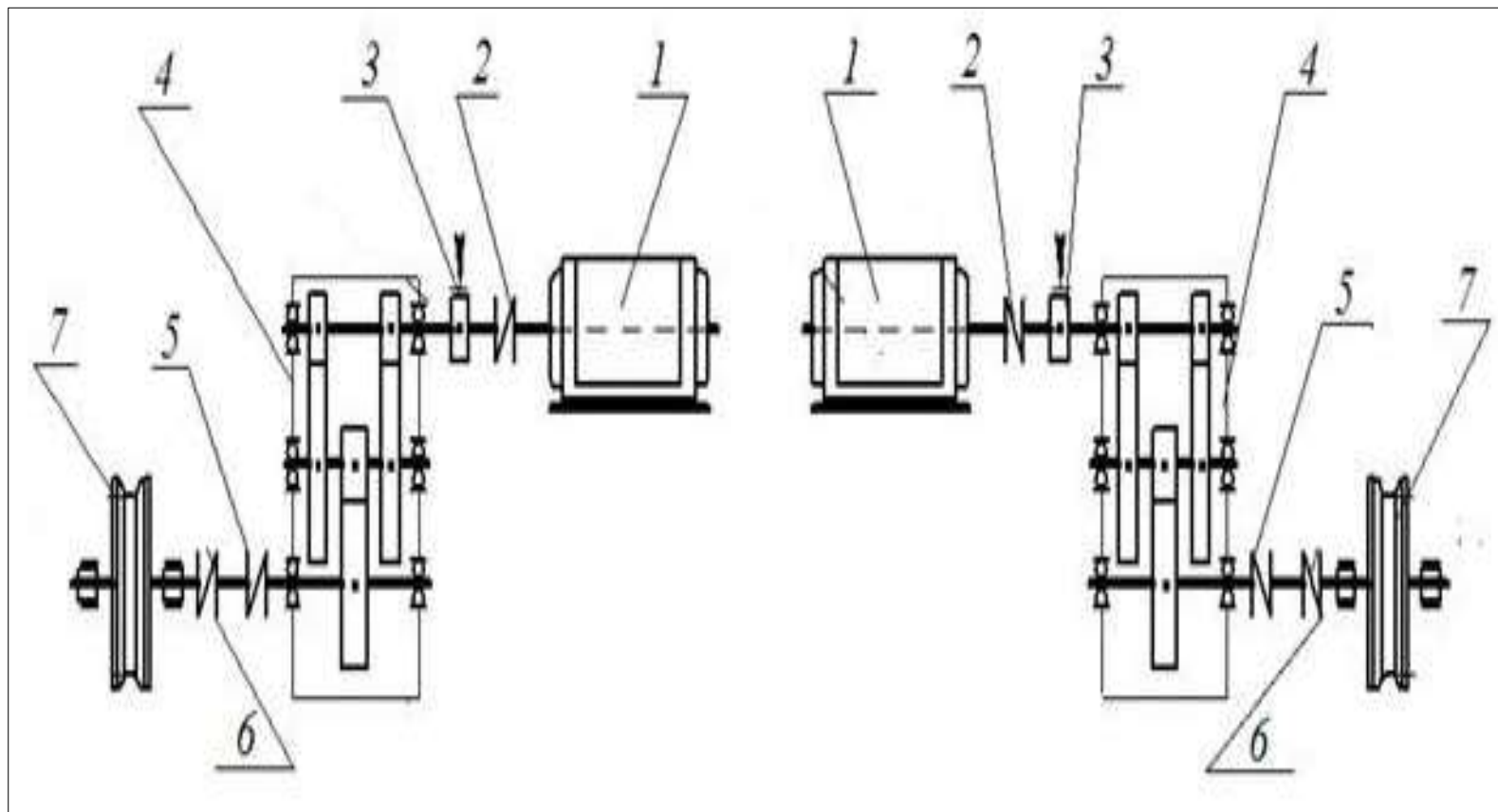
Перечень графического материала.

Конструкция козлового крана ЛТ-62



лебедка 1; грузовая тележка 2; несущая ферма 3; шарнирная опора 4; ходовые тележки 5 и 7; груз 6; жесткая опора 8; кабина крановщика 9

Кинематическая схема механизма передвижения козлового крана



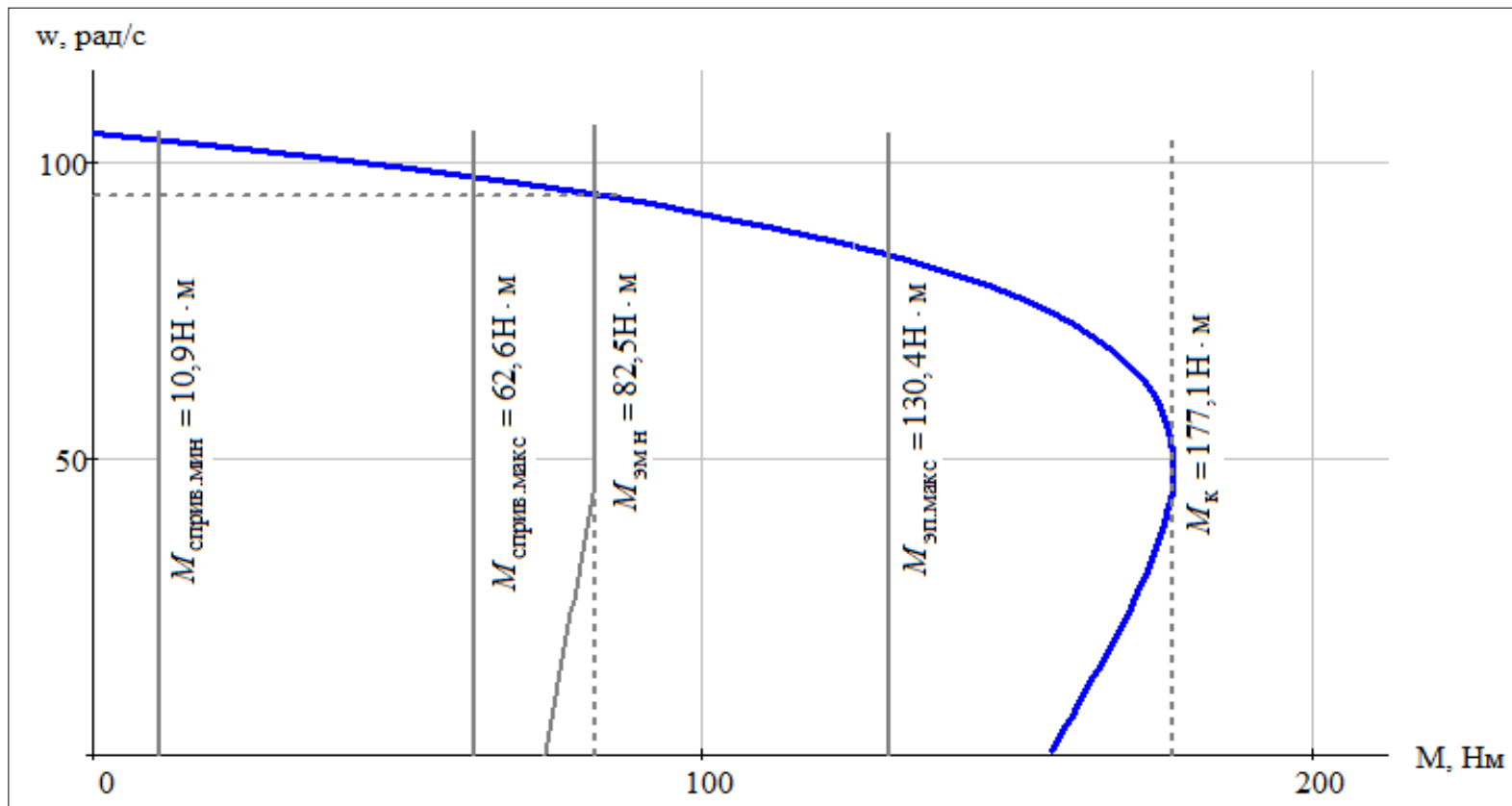
электродвигатель 1; муфта 2; тормоз 3; редуктор 4; зубчатая муфта 5; промежуточный вал 6; ведущее колесо 7

Асинхронный двигатель с
короткозамкнутым ротором

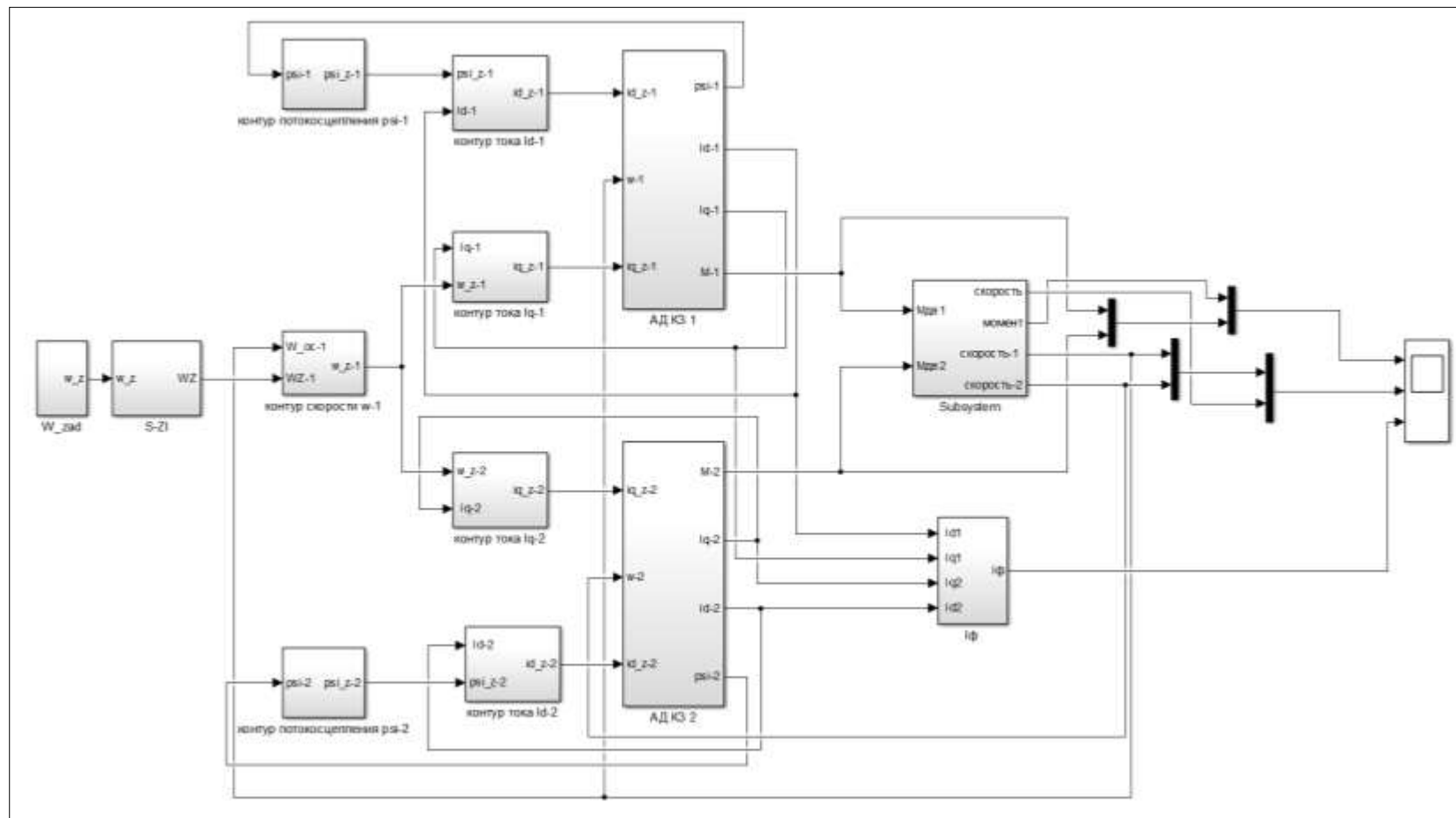


$P_n,$ кВт	$n_n,$ об/мин	$\eta_n,$ %	$\cos\varphi_n$	$J,$ кг·м ²	$s_n,$ %	$m_n,$ о.е.	$m_k,$ о.е.	$k_i,$ о.е.
7,5	900	87	0,87	0,085	10	2,2	2,2	4,2

Механические характеристики асинхронного двигателя и нагрузки

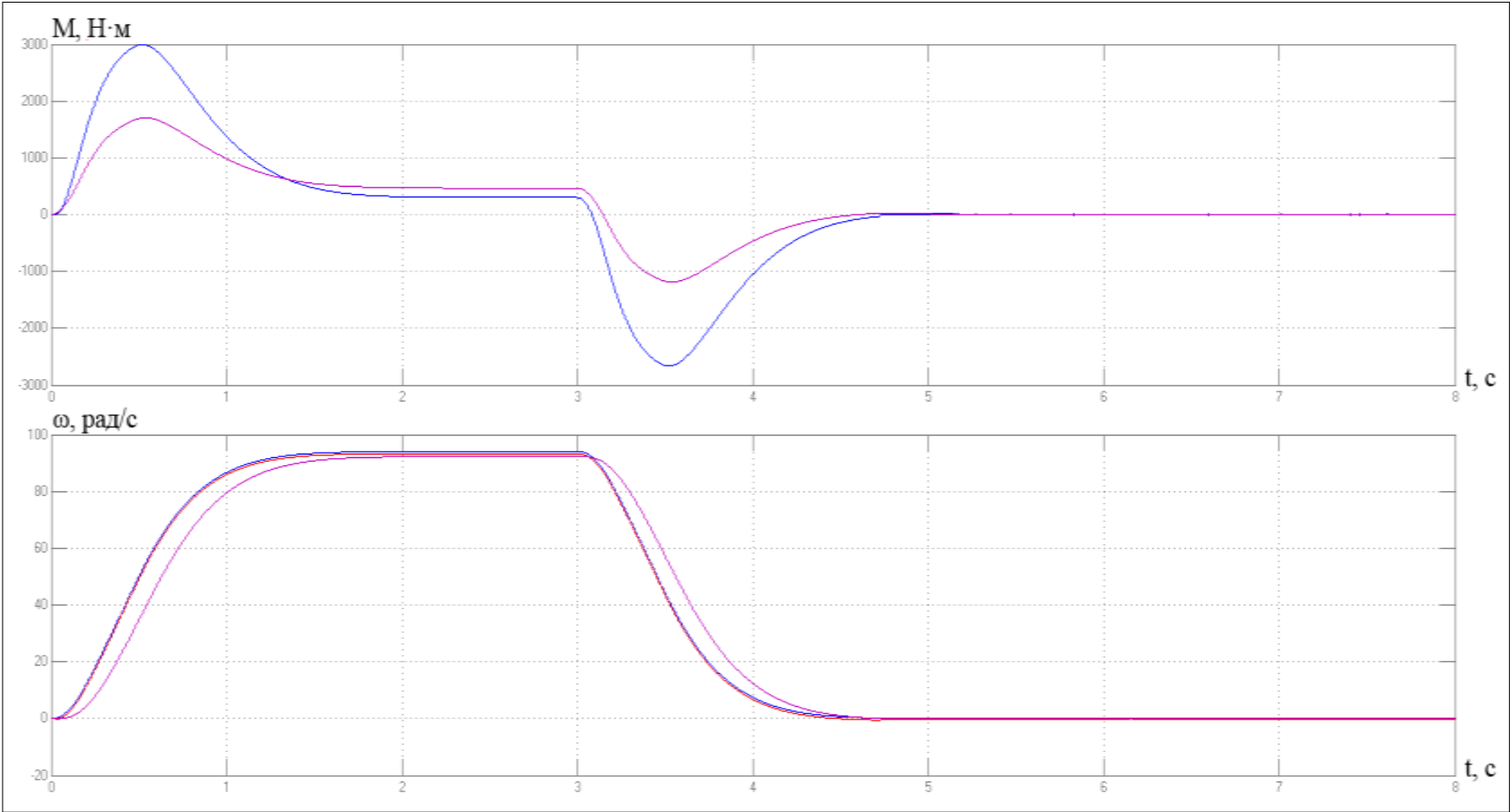


Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении

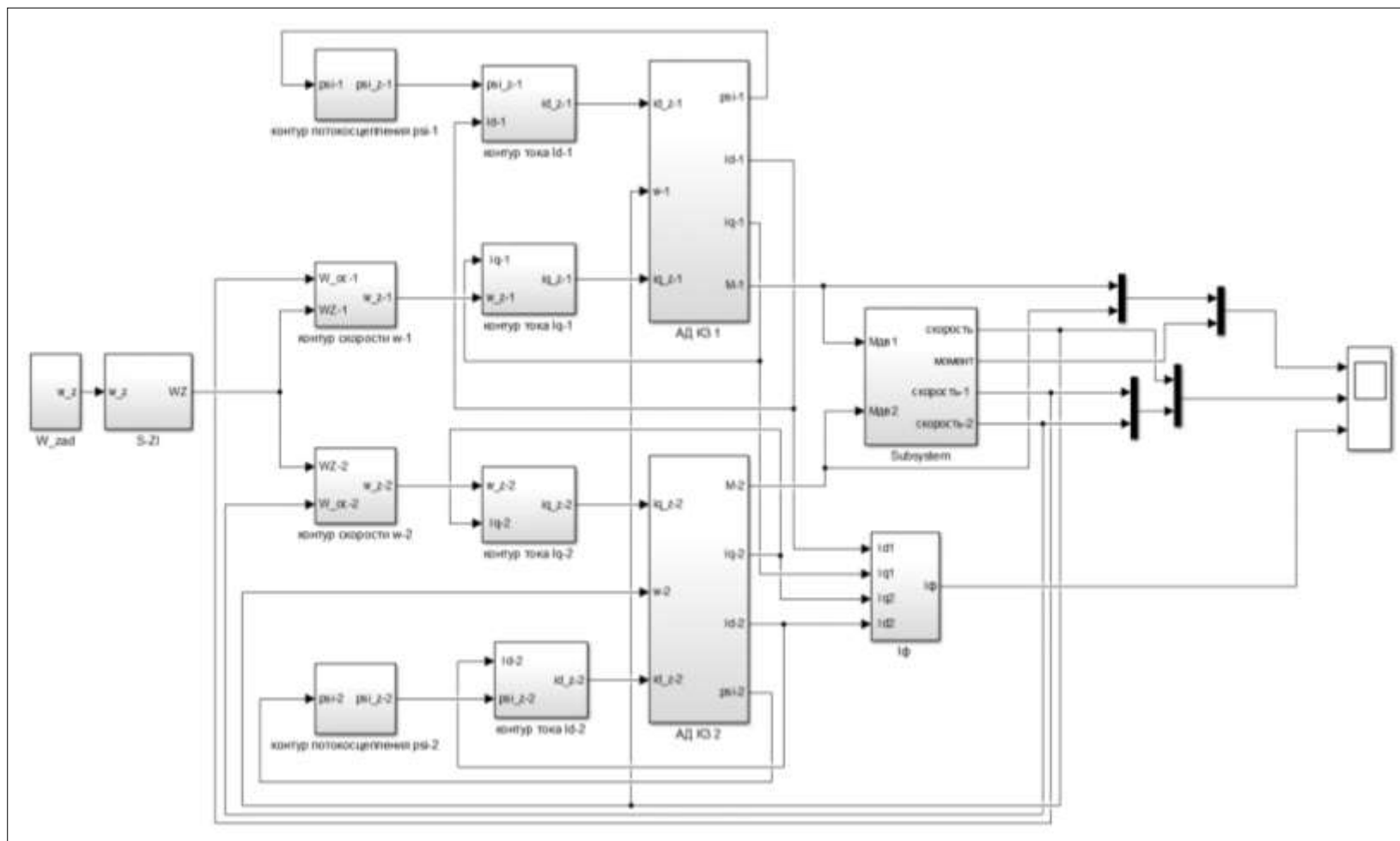


Динамические характеристики двухдвигательного электропривода

М



Имитационная модель двухдвигательного электропривода при векторном управлении с обратной связью для каждого двигателя



Динамические характеристики двухдвигательного электропривода каждого двигателя

