

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

Институт _____ ЭНИН _____

Направление подготовки _____ 13.03.02 Электроэнергетика и
Электротехника _____

Кафедра _____ Электропривод и
электрооборудование _____

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы
Электропривод подъемника установки сухого тушения кокса

УДК 662.741.002.5:621.876:62-83

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗА	Удут Леонид Степанович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Е.А.	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король И.С.	К.Х.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	К.Т.Н		

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

Институт ЭНИН
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и Электротехника
Кафедра Электропривод и электрооборудование

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

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

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврская работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗА	Удут Леониду Степановичу

Тема работы:

Электропривод подъемника установки сухого тушения кокса

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

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.).	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>В данном дипломном проекте было целью спроектировать взрывозащищенный асинхронный двигатель и произвести моделирование данного двигателя. Разобрать технологический процесс общей сборки взрывозащищенного асинхронного двигателя.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>ФЮРА. 313.875.009 К1–Кинематическая схема механизма подъёма ФЮРА. 313.875.009 Э1–Принципиальная схема РЭП ФЮРА. 313.875.009 Э2–Функциональная схема РЭП ФЮРА. 313.875.009 Э3–Структурная схема линейаризованной САУ электропривода ФЮРА. 313.875.009 Д–Результаты моделирования ФЮРА. 313.875.009 С–Технико-экономические показатели</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Король И.С.</p>
<p>Экономическая часть</p>	<p>Грахова Е.А.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ЭПЭО	Дементьев Ю.Н.	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г3А	Удут Леонид Степанович		

Задание для раздела

«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г3А	Удуд Леонид Степанович

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов проектной работы: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	- Проект выполняется в рамках выпускной квалификационной работы - В реализации проекта задействованы 2 человека: инженер, научный руководитель;
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» - Минимальный размер оплаты труда (на 2017 год) составляет 7800 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- Отчисления по страховым взносам – 30 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения проектной работы с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Потенциальные потребители результатов проекта - Анализ конкурентных технических проектных решений - Оценка научно-технического уровня проекта (QuaD-технология)
2. Планирование и формирование бюджета для реализации проекта	- Планирование работ по НТП, - Формирование сметы расходов на проект
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта	- Определение ресурсной и экономической эффективности проекта - Определение научно-технической эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График Ганта	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г3А	Удуд Леонид Степанович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г3А	Удут Леониду Степановичу

Институт	Энергетический (ЭНИН)	Кафедра	Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования: Подъемная лебедка коксовозного вагона установки тушения кокса; Методика исследования: моделирование в программной среде MatLAB; Область применения: Энергетическая отрасль</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). 	<p>К вредным факторам влияющим на организм человека относятся Шум, Вибрация, Угольная пыль. ГОСТ 12.0.003-2015 «Классификация опасных и вредных производственных факторов»; ГОСТ 12.1.003-2014 «Шум. Общие требования безопасности», 85дБ. Защитой от шума служат наушники, вкладыши; ГОСТ 12.1.012-2004 «Вибрационная безопасность», 100дБ локальная, 75дБ общая. Защитой являются антивибрационные перчатки и сапоги.; ГОСТ 12.1.005-88» Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»; ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.; №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681; Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12.2014).</p>
<p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p>	<p>Выявленные опасные факторы производственной среды:</p>

<ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); <p>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>	<ul style="list-style-type: none"> – движущиеся механизмы исследуемого оборудования (ГОСТ 12.4.011 89 Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.); – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека (ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов). Средства защиты от поражения электрического тока (устройства дистанционного управления; предохранительные устройства; молниеотводы и разрядники; знаки безопасности) и т. д.
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); <p>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</p>	<p>Основной проблемой в энергетической сфере являются выбросы в атмосферу некоторых продуктов сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива, к примеру таких как зола. Предельно допустимые значения среднесуточные 0.01 мг/м³, класс опасности 3.</p> <p>- Для очистки выбрасываемых отходов в атмосферу используются золоулавливающие установки. (ГОСТ 17.2.3.02-78 Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями).</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; <p>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</p>	<p>Наиболее вероятной ЧС при эксплуатации Асинхронного электропривода питателя котельного агрегата являются пожар или поражение электрическим током на рабочем месте.</p> <p>Основные причины пожара и загорания в энергетической промышленности относятся следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> -нарушение технологического процесса и неисправность оборудования; -неосторожное обращение с огнем и бытовыми электроприборами; -короткое замыкание электрических проводов и перегрев электрооборудования; <p>Мероприятия по пожарной безопасности разделяются на четыре основные группы:</p> <ul style="list-style-type: none"> -предупреждение пожаров, т.е. исключение причин их возникновения; -ограничение сферы распространения огня; -обеспечение успешной эвакуации людей и материальных ценностей из сферы пожара; -создание условий эффективности тушения пожара

	В соответствии с ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.
4. 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. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.033-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. – ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. – ГОСТ 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования. Человек работающий на станции, должен иметь группу допуска по электробезопасности. Группы делятся от 2 до 5, исходя от Напряжения электроустановки и должности занимаемой на предприятии.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король И.С.	К.Х.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г3А	Удуг Леонид Степанович		

РЕФЕРАТ

Представленная выпускная квалификационная работа содержит 138 страниц, 14 таблицы, 45 рисунок, а также 6 листов графического материала.

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам разработки электропривода подъёмника установки сухого тушения кокса. Рассмотрена методика выбора электросилового оборудования.

За базовый электропривод принят серийно выпускаемый преобразователь частоты и модуль рекуперации марки ALTIVAR, фирмы Schneider Electric, и электродвигатель 1LG4318-8AB-Z фирмы Siemens. Проведёно обоснование выбора, а также анализ основных возможностей преобразователя частоты.

В выпускной квалификационной работе построена модель асинхронного двигателя, на базе которой реализованы законы векторного частотно-токового управления. Построены соответствующие имитационные модели в программной среде MATLAB. Для системы векторного управления проведён оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регуляторов контуров тока, скорости и потокосцепления. Произведено моделирование переходных процессов в электроприводе.

Помимо этого, в работе рассмотрены вопросы техники безопасности и экологичности проекта, проведен расчёт и анализ пусконаладочных работ.

Оглавление

РЕФЕРАТ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 Описание технологического процесса, расчет параметров и характеристик механизма подъемной лебедки.....	13
1.1 Описание технологического процесса производства кокса.....	13
1.2 Конструкция и характеристики лебедки подъемника.....	14
1.3 Требования к электроприводу подъемной лебедки.....	18
1.4 Пространственная и временная диаграммы движения подъёмника.....	19
1.5 Расчет и построение диаграммы моментов.....	20
1.6 Выбор приводных двигателей по мощности.....	28
1.7 Кинематическая схема механизма подъемной лебедки.....	30
1.8 Механическая система электропривода подъемной лебедки.....	31
1.9 Определение приведенных эквивалентных моментов.....	33
инерции и статических моментов нагрузки ДМС.....	33
1.10 Построение области изменения моментов статической.....	36
нагрузки на валу двигателя.....	36
1.11 Определение приведенной эквивалентной угловой жесткости и резонансной частоты ДМС.....	37
1.12 Структурная схема механической системы электропривода подъема.....	40
2 Расчет параметров и характеристик электрической системы электропривода подъемной лебедки.....	41
2.1 Определение дополнительных параметров двигателя.....	41
2.2 Расчёт параметров схемы замещения двигателя.....	42
2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя.....	43
2.4 Построение области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя.....	45
2.5 Построение области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя.....	47
2.6 Выбор преобразователя частоты.....	51
3 Разработка и исследование частотного векторного управления электропривода.....	53
3.1 Система управления электропривода.....	53
3.2 Расчет параметров схемы замещения двигателя.....	54
3.3 Выбор функциональной схемы электропривода.....	56
3.4 Выбор и расчёт параметров преобразователя частоты.....	65
3.5 Выбор и расчет параметров системы управления электропривода.....	68
3.6 Выбор и расчет параметров настройки контуров тока.....	71

3.7 Выбор и расчет параметров настройки контура потокосцепления ротора	74
3.8 Выбор и расчет параметров настройки контура скорости	76
3.9 Выбор и расчет параметров настройки задатчика скорости.....	78
3.10 Разработка и исследование имитационной модели электропривода подъемной лебедки .81	
3.10.1 Разработка имитационной модели электропривода	81
3.10.2 Одномассовая механическая система электропривода	89
3.10.3 Исследования имитационной модели электропривода с ОМС.....	90
3.10.4 Двухмассовая механическая система электропривода	96
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	103
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	104
4.1.1 Потенциальные потребители проекта	104
4.1.2 Технология QuaD	104
4.2. Планирование работ по НТП	107
4.2.1. Структура работ в рамках проекта	107
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	109
4.2.3. Разработка графика проведения проектирования.....	110
4.3 Смета затрат на проектирование	113
4.3.1 Смета затрат на подготовку проекта	115
4.3.2 Отчисления на социальные нужды.....	116
4.3.4 Амортизация вычислительной техники	117
4.3.5 Прочие неучтенные затраты.....	117
5 Социальная ответственность	119
5.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	119
5.2 Производственная санитария	120
5.3 Расчет искусственного освещения	121
5.3.1 Выбор осветительных приборов.....	122
5.3.2 Выбор коэффициента запаса	122
5.3.3 Размещение осветительных приборов	123
5.3.4 Расчет осветительной установки.....	124
5.4 Микроклимат	125
5.5 Техника безопасности	128
5.6 Пожарная безопасность.....	130
5.6.1 Каждый работающий на объединении должен знать.....	131
5.7 Охрана окружающей среды	132

5.8 Чрезвычайная ситуация	133
Заключение	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	138

ВВЕДЕНИЕ

Современное металлургическое производство является крупным потребителем электрической энергии. В его электрификации особое место занимает электрический привод, что определяется непрерывно растущим потреблением электроэнергии на двигательную силу. Возрастающая роль электропривода связана также с тем обстоятельством, что современный автоматизированный электропривод в значительной мере стал определять прогресс в областях техники и технологии, связанных с воспроизводством механических движений.

Автоматизированный электропривод способен полностью обеспечить автоматизацию технологического процесса, достичь высокого быстродействия и точности в своей работе, улучшить условия труда обслуживающего персонала.

Использование в электроприводе асинхронных электродвигателей и частотных преобразователей позволяет экономить электроэнергию на уровне 20..30%, а так же уменьшить затраты на ремонт силового оборудования. Частотные преобразователи в своей работе «мягко» запускают электродвигатели и, следовательно, механическое оборудование, на котором они установлены, что увеличивает срок их службы.

1 Описание технологического процесса, расчет параметров и характеристик механизма подъемной лебедки

1.1 Описание технологического процесса производства кокса

Производство кокса из угольной шихты осуществляется в коксовых печах. Коксовые печи объединяются в батареи, а батареи компонуются в блоки. Производство кокса осуществляется в непрерывном режиме с периодической выдачей кокса из отдельных блоков по циклическому графику [1].

Процесс производства кокса состоит из следующих технологических операций:

- загрузки камер коксования угольной шихтой;
- процесса коксования;
- мокрого или сухого тушения кокса;
- сортировки кокса по крупности.

Коксовые печи обслуживают следующие коксовые машины:

- углезагрузочный вагон;
- коксовыталкиватель;
- коксотушильный (коксовозный) вагон с электровозом.

Выдача кокса из камеры производится коксовыталкивателем в коксотушильный вагон.

Коксотушильный вагон состоит из платформы с ходовыми тележками и съёмного кузова с разгрузочными затворами. Стенки съёмного кузова облицованы жароупорными плитами. Емкость кузова 24 тонны. Передвижение тушильного вагона производится обычно электровозом.

Коксотушильный вагон служит для выполнения следующих технологических операций:

- приема раскаленного кокса из печи;

– транспортировки кокса к шахте подъемника тушильной установки.

Съемный кузов тушильного вагона с раскаленным коксом поднимается вверх установки тушения кокса специальным подъемником.

Подъемник осуществляет следующие операции:

- подъем груженого кузова с платформы вагона;
- транспортировку кузова к разгрузочному устройству;
- разгрузки раскаленного кокса из кузова в камеру сухого тушения;
- транспортировку порожнего кузова на ось шахты;
- спуск порожнего кузова на платформу вагона.

1.2 Конструкция и характеристики лебедки подъемника

Кинематическая схема механизм подъемной лебедки приведена на рисунке 1 и состоит из следующих устройств:

- 1 – командоаппарат;
- 2 – барабан;
- 3 – четыре тормоза;
- 4 – четыре электродвигателя;
- 5 – два зубчатых цилиндрических редуктора.

Четыре электродвигателя через два редуктора вращают барабан.

Барабан имеет левую и правую нарезку для укладки канатов. Правая и левая нарезки барабана рассчитаны на укладку 1,5 витков для крепления каната, 1,5 витков запасных и 30 витков рабочих. Общая расчетная длина одной ветви каната 158 метров.

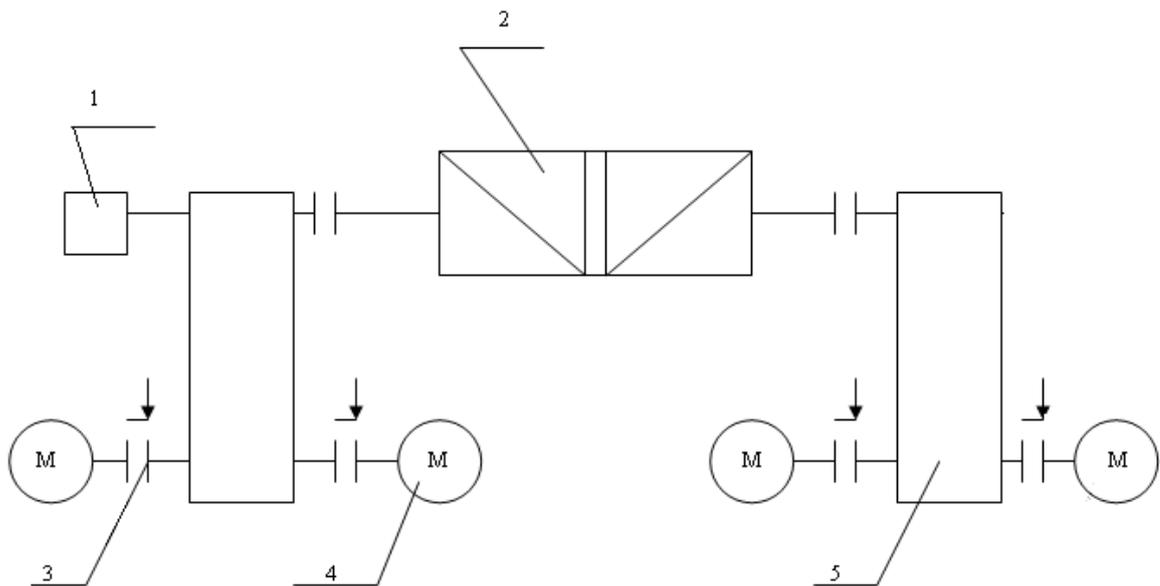


Рисунок 1 – Кинематическая схема механизма подъёмной лебедки

Захват кузова с раскаленным коксом с платформы коксовозного вагона и транспортировка его к камере тушения и обратно производится при помощи механизма захвата.

Кинематическая схема механизма захвата представлена на рисунке 2 и состоит из следующих устройств:

- 1 – две пары сдвоенных блоков – сдвоенный полиспаст;
- 2 – предохранительное (демпфирующее) устройство;
- 3 – верхняя и нижняя траверсы;
- 4 – два захватных крюка, закрепленных на нижней траверсе;
- 5 – тепловой экран.

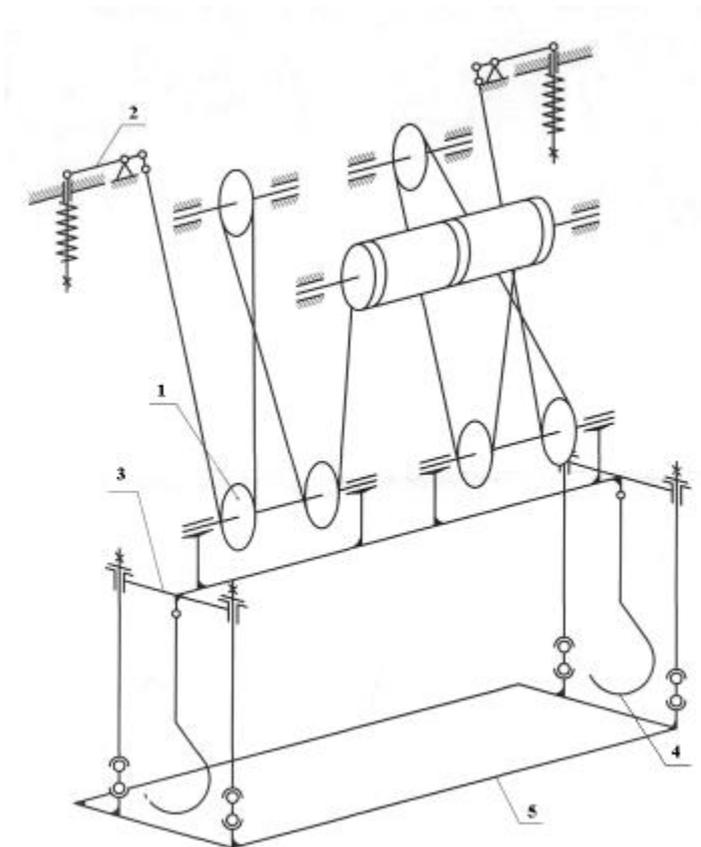


Рисунок 2 – Кинематическая схема захватного устройства подъемной лебедки

Технические параметры подъемника приведены в таблице 1.
Дополнительные параметры подъемной лебедки:

- редуктор CNZ-500, КПД трехступенчатого редуктора принято $\eta_{ред} = 0.9$;
- диаметр каната, $d_k = 32$ мм;
- $\eta_{мех} = 0.86$ – общий КПД механизма подъема принят согласно [0, табл.2];
- $l=6$ м – расстояние до разгрузочного устройства.

Требуемые значения скорости движения в режиме подъема/спуска:

- при закрытие/раскрытии захватов 0.1 м/с,
- в направляющих лафета и подъемника 0.25 м/с,
- в стационарных направляющих шахты 0.5 м/с;

при транспортировки к разгрузочному устройству и обратно 0.3м/с.

Таблица 1 – Техническая характеристика подъемника

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Масса кокса	m_k	кг	24000
Масса пустого вагона	m_B	кг	29500
Масса траверсы верхней	$m_{ТВ}$	кг	5650
Масса траверсы нижней	$m_{ТН}$	кг	2027
Диаметр барабана	$D_б$	м	1.21
Передаточное отношение редуктора	$i_{ред}$		23,255
Номинальный выходной момент редуктора	$M_{ред.ном}$	Н·м	47500
Кратность полиспаста	$i_{пол}$		4
Высота подъема в шахте	H	м	24.8
Высота спуска в разгрузочной камере	h	м	0.605
Рабочая скорость подъёма/спуска	$v_{п}$	м/с	0.5
Рабочая (номинальная) грузоподъемность	$m_{груз.ном}$	кг	50000
Расстояние до камеры	L	м	24
Скорость передвижения	$v_{л}$	м/с	0.3
Производительность		кг/час	120000
Режим работы		циклический	

1.3 Требования к электроприводу подъемной лебедки

К электроприводу механизма подъемной лебедки установки тушения кокса предъявляются следующие требования:

- точное выполнение заданной тахограммы движения;
- плавное изменение скорости в начале и в конце подъема и спуска;
- точная остановка кузова в шахте и у подъемника;
- диапазон регулирования скорости не менее 1:5 в установившихся режимах работы;
- обеспечение работы лебедки в соответствии с технологическим процессом при выходе из строя одного электродвигателя.

До модернизации электропривода подъемника спуск и подъем съемного кузова осуществляется подъёмником с установленными на нем четырьмя асинхронными двигателями с фазным ротором типа МТН713-10 суммарной мощностью 520 кВт. Практика показала, что, вследствие тяжелого режима работы необходимость в замене одного из двигателей по причине выхода его из строя составляет 1 раз в полтора месяца. При применении системы управления с частотным регулированием спуск и подъем кузова будут осуществлять четыре асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором. Частотные преобразователи обеспечат плавное управление электродвигателями с ограничением статических и динамических моментов на их валу. Это увеличит срок службы двигателей и механического оборудования и уменьшит количество их ремонтов. Использование частотных преобразователей позволит экономить электроэнергию.

В качестве технических средств реализации системы электропривода будут применены электродвигатели и электронное оборудование фирмы SIEMENS и Schneider Electric, получивших широкое применение при модернизации электрооборудования и электроприводов производственных механизмов металлургических производств.

1.4 Пространственная и временная диаграммы движения подъёмника

Пространственные перемещения подъёмника представлены на рисунке 3. На диаграмме рисунка 3 указаны протяженности участков и скорости движения на них, а также приняты следующие обозначения:

т.0 – т.1 – участок сведения (раскрытия) захватов, выбора зазоров и натяжения канатов при подъеме;

т.1 – т.2 – участок подъёма (спуска) с платформы в направляющих лафета;

т.2 – т.3 – участок подъёма (спуска) в стационарных направляющих шахты;

т.3 – т.4 – участок подъёма (спуска) в стационарных направляющих подъёмника;

т.4 – т.5 – участок движения до камеры;

т.5 – т.6 – участок спуска (подъёма) над камерой.

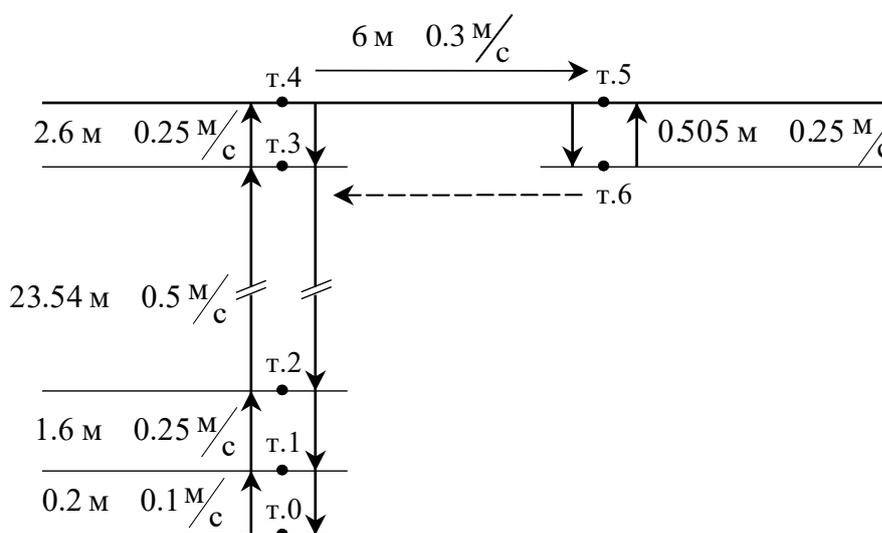


Рисунок 3 – Пространственная диаграмма движения подъёмника

Временная диаграмма скорости (тахограмма) работы механизма подъёма приведена на рисунке 4. При расчете диаграммы скорости $v(t)$

принято максимальное допустимое значение ускорения (замедления) для металлургических специальных кранов $a = 0.5 \text{ м/с}^2$ [2].

1.5 Расчет и построение диаграммы моментов

Значения статических $M_{\text{ст}i}$ и динамических $M_{\text{дин}i}$ моментов на отдельных рабочих участках диаграммы движения подъемника, рассчитываются по следующим приближенным выражениям в общем виде:

– статическая составляющая момента при подъеме

$$M_{\text{ст}i} = \frac{(m_{\text{ТВ}} + m_{\text{ТН}} + m_{\text{В}} + m_{\text{ГР}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{мех}}};$$

– статическая составляющая момента при спуске

$$M_{\text{ст}i} = \frac{(m_{\text{ТВ}} + m_{\text{ТН}} + m_{\text{В}} + m_{\text{ГР}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{мех}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}};$$

– статический момент при удержании

$$M_{\text{ст}i} = \frac{(m_{\text{ТВ}} + m_{\text{ТН}} + m_{\text{В}} + m_{\text{ГР}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}};$$

– динамическая составляющая момента

$$M_{\text{дин}i} = \frac{(m_{\text{ТВ}} + m_{\text{ТН}} + m_{\text{В}} + m_{\text{ГР}}) \cdot a \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{мех}}}.$$

Моменты при подъеме кузова с лафета и сведения захватов (т.0 – т.1 на диаграмме рисунка 3, где $m_{\text{ГР}} = 0$ и $m_{\text{В}} = 0$):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = \frac{(5650 + 2227) \cdot 0.5 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 33.1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{(5650 + 2227) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 649.33 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент на участке ускорения

$$M_{\text{уск}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = 33.1 + 649.33 = 682.43 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

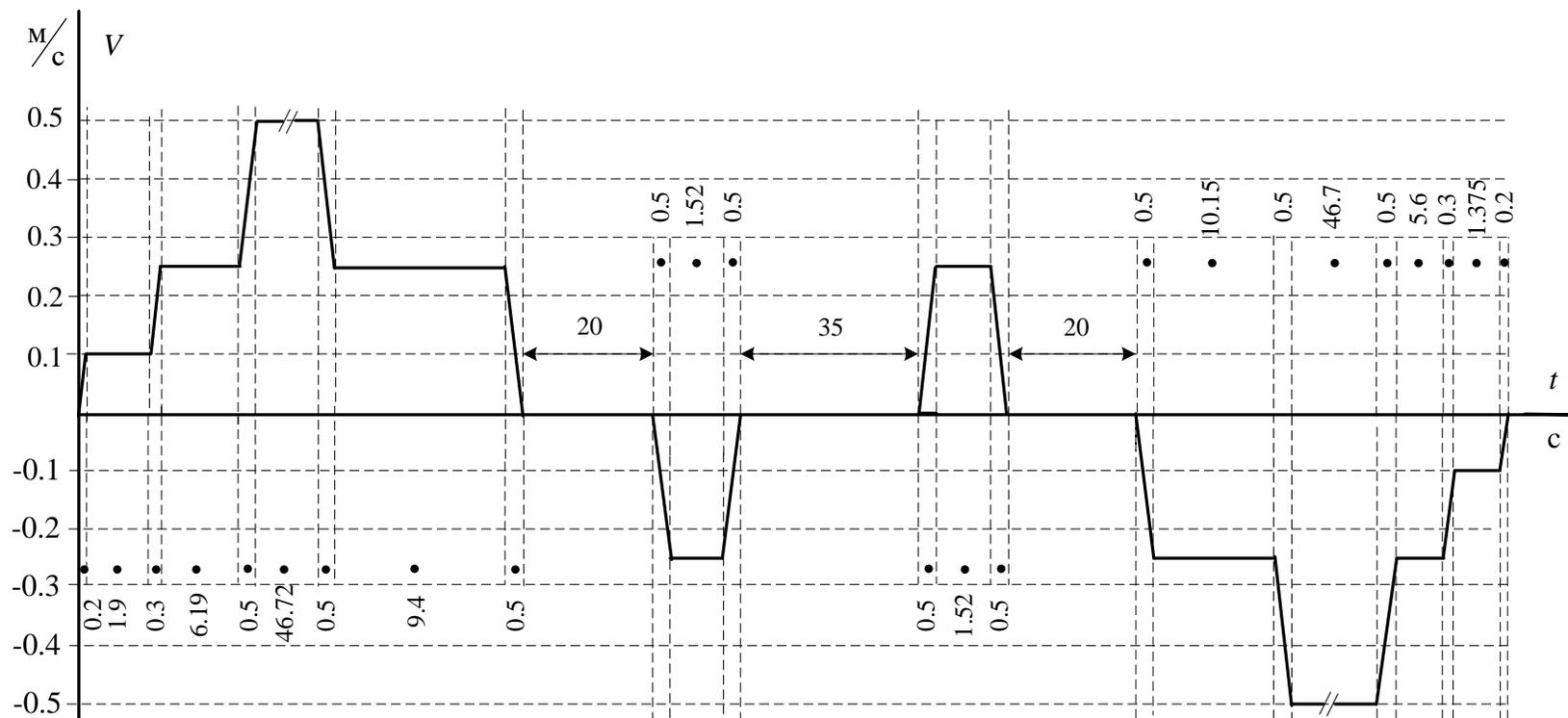


Рисунок 4 – Тахограмма работы механизма подъёма

Моменты при подъеме в направляющих лафета (т.1 – т.2):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = \frac{(5650 + 2227 + 24000 + 29500) \cdot 0.5 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 257.88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{(5650 + 2227 + 24000 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 5059.56 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент на участке ускорения

$$M_{\text{уск}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = 257.9 + 5059.56 = 5317.46 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при подъеме в направляющих шахты (т.2 – т.3):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = 257.88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{дин}} = 5059.56 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент на участке ускорения

$$M_{\text{уск}} = 5317.44 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при подъеме в стационарных направляющих подъемника (т.3 – т.4):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = 257.88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = 5059.56 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при замедлении

$$M_{\text{зам}} = -M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = -257.88 + 5059.56 = 4801.68 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Статический момент при удержании заполненного вагона

$$M_{\text{ст1}} = \frac{(5650 + 2227 + 24000 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4} = 3916.1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при спуске на камеру в стационарных направляющих подъемника (т.5 – т.6):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = 257.88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{(5650 + 2227 + 24000 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21 \cdot 0.9 \cdot 0.86}{2 \cdot 23.255 \cdot 4} = 3031.06 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при ускорении

$$M_{\text{уск}} = -M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = -257.88 + 3031.06 = 2773.18 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при замедлении

$$M_{\text{зам}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = 257.88 + 3031.06 = 3288.94 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Средний статический момент удержания вагона при разгрузке

$$M_{\text{ст2}} = \frac{M_{\text{ст1}} + M_{\text{ст3}}}{2} = \frac{3916.1 + 2384.8}{2} = 3150.45 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при подъеме с камеры в стационарных направляющих подъемника (т.6 – т.5, где $m_{\text{гр}} = 0$):

– динамический момент

$$M_{\text{дин}} = \frac{(5650 + 2227 + 29500) \cdot 0.5 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 148.64 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{(5650 + 2227 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 3081.14 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при ускорении

$$M_{\text{уск}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = 148.64 + 3081.14 = 3229.8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при замедлении

$$M_{\text{зам}} = -M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = -148.64 + 3081.14 = 2932.5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Статический момент при удержании порожнего вагона

$$M_{\text{ст3}} = \frac{(5650 + 2227 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4} = 2384.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Моменты при спуске в стационарных направляющих подъемника (т.4 – т.3, где $m_{гр} = 0$):

– динамический момент

$$M_{дин} = 148.64 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{ст} = \frac{(5650 + 2227 + 29500) \cdot 9.81 \cdot 1.21 \cdot 0.9 \cdot 0.86}{2 \cdot 23.255 \cdot 4} = 1845.84 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при ускорении

$$M_{уск} = -M_{дин} + M_{ст} = -148.64 + 1845.84 = 1697.2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при спуске в направляющих шахты (т.3 – т.2, где $m_{гр} = 0$):

– динамический момент

$$M_{дин} = 148.64 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{ст} = 1845.84 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при ускорении

$$M_{уск} = -M_{дин} + M_{ст} = -148.64 + 1845.84 = 1697.2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при спуске в направляющих лафета (т.2 – т.1, где $m_{гр} = 0$):

– динамический момент

$$M_{дин} = 148.64 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{ст} = 1845.84 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при замедлении

$$M_{зам} = M_{дин} + M_{ст} = 148.64 + 1845.84 = 1994.5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Моменты при спуске и раскрытие захватов (т.1 – т.0, где $m_{гр} = 0$ и $m_{в} = 0$):

– динамический момент

$$M_{дин} = \frac{(5650 + 2227) \cdot 0.5 \cdot 1.21}{2 \cdot 23.255 \cdot 4 \cdot 0.9 \cdot 0.86} = 33.1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– статический момент

$$M_{\text{ст}} = \frac{(5650 + 2227) \cdot 9.81 \cdot 1.21 \cdot 0.9 \cdot 0.86}{2 \cdot 23.255 \cdot 4} = 321.48 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– полный момент при замедлении

$$M_{\text{зам}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}} = 33.1 + 321.49 = 354.6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По результатам расчетов на рисунке 5 построена диаграмма приведенного момента нагрузки на валу двигателей механизма подъёма.

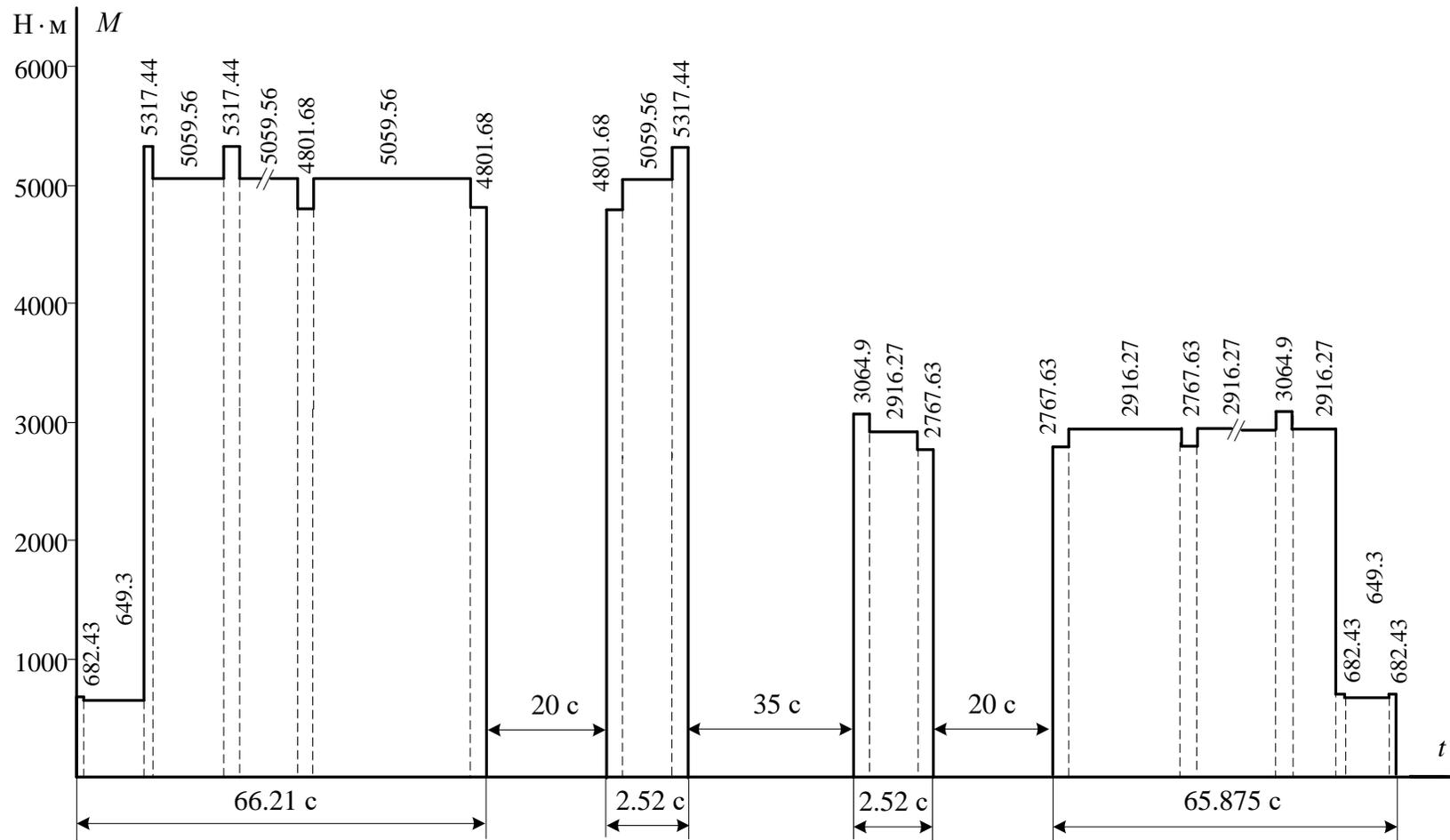


Рисунок 5 – Нагрузочная диаграмма механизма подъёма

1.6 Выбор приводных двигателей по мощности

Максимальная требуемая скорость вращения приводных электродвигателей:

$$\omega_{\text{ЭП макс}} = \frac{2 \cdot v_{\text{макс}}}{D_{\text{б}}} \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} = \frac{2 \cdot 0.5}{1.21} \cdot 23.255 \cdot 4 = 76.876 \text{ рад/с};$$

$$n_{\text{ЭП макс}} = \omega_{\text{ЭП макс}} \cdot \frac{30}{\pi} = 76.876 \cdot \frac{30}{\pi} = 734.13 \text{ об/мин.}$$

Время рабочего цикла подъемника с учетом электрического удержания вагона при передвижениях подъемника и разгрузки вагона (рисунок 4)

$$T_{\text{ц под}} = 66.21 + 20 + 2.52 + 35 + 2.52 + 20 + 65.875 = 212.125 \text{ с.}$$

Эквивалентный момент на интервале рабочего цикла для одного двигателя

$$M_{\text{экв1}} = \frac{1}{n} \cdot k_{\text{зап}} \cdot \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_{pi}}{T_{\text{ц под}}}} = \frac{1}{4} \cdot 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2.679285137 \cdot 10^9}{224.125}} = 1021.2 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где

$$\begin{aligned} \sum M_i^2 \cdot t_{pi} = & (682.43^2 \cdot 0.2 + 649.3^2 \cdot 1.9 + 5317.44^2 \cdot 0.3 + 5059.56^2 \cdot 6.19 + \\ & + 5317.44^2 \cdot 0.5 + 5059.56^2 \cdot 46.72 + 4801.68^2 \cdot 0.5 + 5059.56^2 \cdot 9.4 + 4801.68^2 \cdot 0.5) + \\ & + 3916.1^2 \cdot 20 + (2773.18^2 \cdot 0.5 + 3031.06^2 \cdot 1.52 + 3288.94^2 \cdot 0.5) + \\ & + 3150.45^2 \cdot 35 + (3229.8^2 \cdot 0.5 + 3081.14 \cdot 27^2 \cdot 1.52 + 2932.5^2 \cdot 0.5) + 23.84.8^2 \cdot 20 + \\ & + (1697.2^2 \cdot 0.5 + 1845.84^2 \cdot 10.15 + 1697.2^2 \cdot 0.5 + 1845.84^2 \cdot 46.7 + 1994.5^2 \cdot 0.5 + \\ & + 1845.84^2 \cdot 5.65 + 1994.5^2 \cdot 0.3 + 321.48^2 \cdot 1.375 + 354.6^2 \cdot 0.2) = 2.679285137 \cdot 10^9 ; \end{aligned}$$

M_i – значения моментов подъема или спуска на отдельных рабочих участках диаграммы движения подъемника;

t_{pi} – длительность отдельных рабочих участков, с.

$k_{\text{зап}} = (1.1 \div 1.2)$ – коэффициент запаса, учитывающий динамические моменты, связанные с маховыми массами роторов приводных двигателей.

С учетом требования обеспечить работоспособность подъемника в режиме работы тремя двигателями

$$M_{\text{экв1}}^* = \frac{4}{3} \cdot M_{\text{экв1}} = \frac{4}{3} \cdot 1021.8 = 1362.4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Минимальное технологическое время цикла работы подъемника $T_{\text{ц техн}} \geq 720 \text{ с}$, т.е. больше 10 минут. Следовательно, режим работы двигателей подъемника не может быть отнесен к одному из номинальных режимов работы электродвигателей, что затрудняет выбор их номинальных параметров [4].

Поскольку при частотном регулировании и ограниченном напряжении сети не может быть обеспечена скорость двигателя близкая к номинальной, принимаем решение выбирать электродвигатели с синхронной скоростью 1000 об/мин. Номинальный момент двигателей выберем ориентируясь на номинальный момент двигателей подъемной лебедки до её модернизации.

В качестве приводного электродвигателя выбран асинхронный электродвигатель фирмы SIEMENS серии 1LG4317-6AA с номинальными параметрами: $P_{\text{н}} = 132 \text{ кВт}$; $n_{\text{н}} = 988 \text{ об/мин}$, $f_{\text{н}} = 50 \text{ Гц}$. Эта серия двигателей общего назначения предназначена для широкого регулирования скорости с использованием преобразователей частоты. Двигатели снабжены независимым вентилятором и встроенным импульсным датчиком.

Технические данные двигателя приведены в таблице 2 и рисунке 6 [6].

Таблица 2 – Технические данные двигателя 1LG4317-6AA

P_H , кВт	n_0 , об/мин	$U_{лн}$, В	При номинальной нагрузке			
			n_H , об/мин	$I_{лн}$, А	η_H , %	$\cos\varphi_H$
132	1000	400	988	235	94.8	0.86
				m_{II}	m_K	$k_{iДВ}$
$\eta_{0.75}$, %	Z_p					
95.0	3			3.1	3	7.5
Габарит	J , кг·м ²	Исполнение по степени защиты				
		IP55				
315L	4.0					

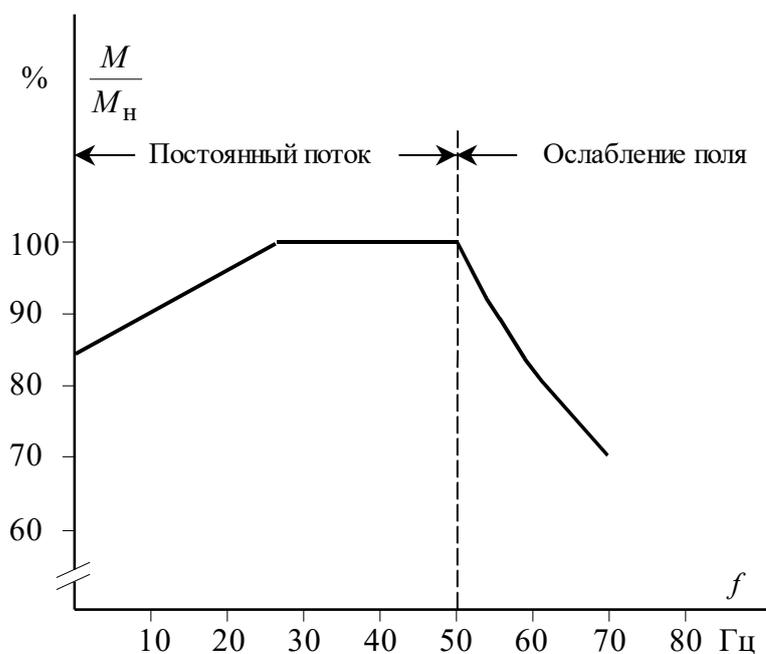


Рисунок 6 – Характеристика длительно допустимого момента двигателя серии 1LG4 с независимым вентилятором

1.7 Кинематическая схема механизма подъемной лебедки

Полная кинематическая схема механизма подъёма приведена на рисунке 7. На рисунке приняты следующие обозначения:

$M1-M4$ – приводные двигатели 1LG4317-6AA

- 1 – редуктор CNZ-500, $i_{ред} = 23.255$, $\eta_{ред} = 0.9$ (принято);
- 2 – барабан, $D_б = 1.21$ м;
- 3 – канат, $d_к = 32$ мм;
- 4 – полиспаст, $i_{пол} = 4$;
- 5 – верхняя и нижняя траверсы: $m_{ТВ} = 5650$ кг, $m_{ТН} = 2027$ кг;
- 6 – демпфирующее устройство.
- Общий КПД механизма принят $\eta_{мех} = 0.86$.

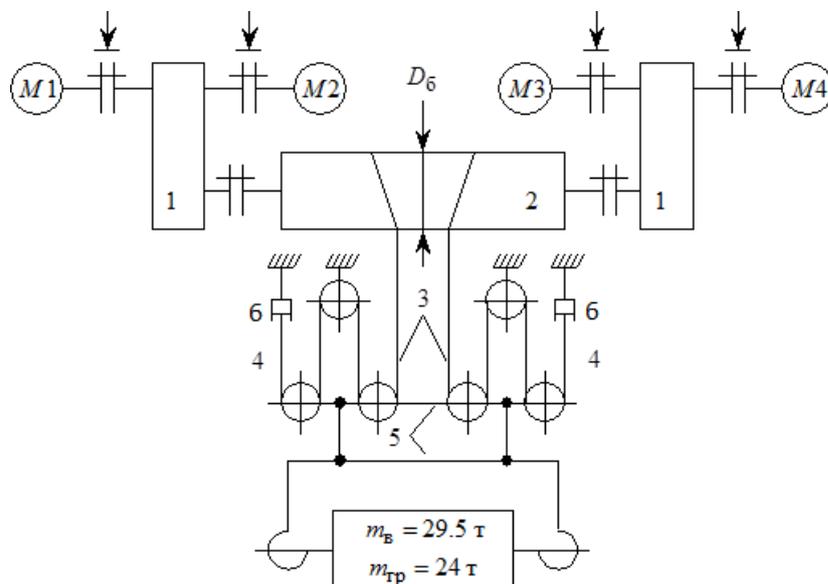


Рисунок 7 – Кинематическая схема механизма подъема

1.8 Механическая система электропривода подъемной лебедки

Если предположить, что электродвигатели и редукторы идентичны, то их можно заменить эквивалентными с параметрами:

– двигателя

$$J_{дв\ \varepsilon} = 4 \cdot J_{дв} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$\Delta M_{с\ дв\ \varepsilon} = 4 \cdot \Delta M_{с\ дв}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– редуктора

$$M_{\text{вых.ред } \varepsilon} = 2 \cdot M_{\text{вых.ред}} = 2 \cdot 47.5 \cdot 10^3 = 95 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\eta_{\text{ред}} = 0.9, i_{\text{ред}} = 23.255.$$

Преобразованная кинематическая схема подъемной лебедки приведена на рисунке 8.

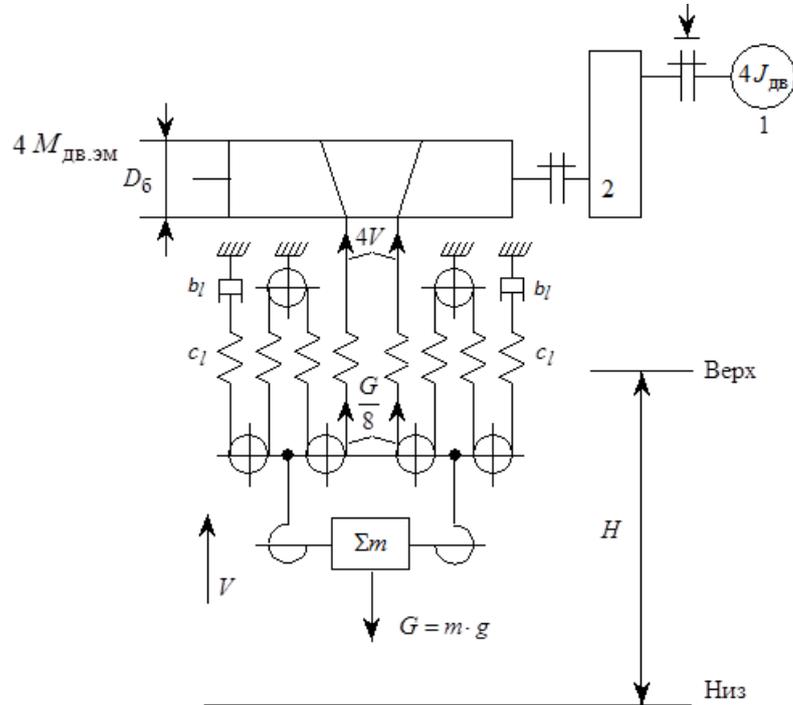


Рисунок 8 – Преобразованная кинематическая схема подъемной лебедки

На схеме рисунка 8 приняты следующие обозначения:

1 – эквивалентный двигатель;

2 – эквивалентный редуктор.

Расчетная схема механической системы электропривода подъема приведена на рисунке 9.

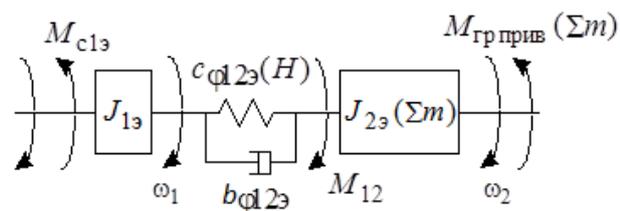


Рисунок 9 – Расчетная схема механической системы электропривода

Механизм подъема представляет собой двухмассовую механическую систему (ДМС) [11]:

– первую массу образуют все вращающиеся части лебедки с электродвигателями;

– вторую массу, подвешенную на гибких тросах, образуют верхняя и нижняя траверсы и порожний или заполненный вагон.

На схеме рисунка 9 приняты следующие обозначения:

$4M_{\text{двэм}}$ – момент на валу эквивалентного двигателя, Н·м ;

$J_{1э}$ – эквивалентный приведенный момент инерции первой массы, кг·м²;

$\Delta M_{\text{с1э}}$ – эквивалентный приведенный момент от сил трения на валу первой массы, Н·м ;

$c_{\varphi 12э}(H)$ – эквивалентный приведенный коэффициент угловой жесткости, зависящий от высоты подъема H , Н·м/рад ;

$b_{\varphi 12э}$ – приведенный эквивалентный коэффициент демпфирования канатов и демпферного устройства (рисунок 2), $\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right)$;

M_{12} – момент, передаваемый через упругий элемент, Н·м ;

$J_{2э}(\Sigma m)$ – эквивалентный приведенный момент инерции второй массы, зависящий от массы груза, кг·м²;

$M_{\text{грприв}}(\Sigma m)$ – приведенный момент, развиваемый грузом, зависящий от массы поднимаемого (опускаемого) груза, Н·м .

1.9 Определение приведенных эквивалентных моментов инерции и статических моментов нагрузки ДМС

Приведенный эквивалентный момент инерции первой массы

$$J_{1э} = (1.2 \div 1.25) \cdot J_{\text{двэ}} = (1.2 \div 1.25) \cdot 16 = 19.5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведенный эквивалентный момент инерции второй массы:

– при подъеме (спуске) заполненного вагона

$$J_{2Э \text{ макс}} = (m_{ТВ} + m_{ТН} + m_{В} + m_{Гр} + m_{К}) \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} =$$

$$= (5650 + 2227 + 29500 + 24000 + 664) \cdot \left(\frac{1.21}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{23.255^2 \cdot 4^2} = 2.624 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ;$$

– при подъеме (спуске) порожнего вагона

$$J_{2Э \text{ мин}} = (m_{ТВ} + m_{ТН} + m_{В} + m_{К}) \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} =$$

$$= (5650 + 2227 + 29500 + 664) \cdot \left(\frac{1.21}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{23.255^2 \cdot 4^2} = 1.61 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ;$$

– при подъеме (спуске) пустого грузозахватного приспособления

$$J_{2Э \text{ хх}} = (m_{ТВ} + m_{ТН} + m_{К}) \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} =$$

$$= (5650 + 2227 + 664) \cdot \left(\frac{1.21}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{23.255^2 \cdot 4^2} = 0.256 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Приведенный статический момент нагрузки на валу эквивалентного двигателя рассчитывается по выражениям:

– при подъеме (I квадрант)

$$M_{с \text{ под}} = M_{с \text{ гр}} + (\Delta M_{с \text{ ред прив}} + \Delta M_{с \text{ мех прив}}), \text{ Н} \cdot \text{м} ;$$

– при тормозном (IV квадрант) и силовом (III квадрант) спуске

$$M_{с \text{ сп}} = M_{с \text{ гр}} - (\Delta M_{с \text{ ред прив}} + \Delta M_{с \text{ мех прив}}), \text{ Н} \cdot \text{м} ;$$

где

$$\Delta M_{с \text{ ред прив}} = a_{ред} \cdot \frac{2 \cdot M_{ред ном}}{i_{ред}} + b_{ред} \cdot M_{гр прив}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

– приведенный момент постоянных и переменных потерь редуктора;

$$a_{ред} = b_{ред} = \frac{1 - \eta_{ред ном}}{2 \cdot \eta_{ред ном}} = \frac{1 - 0.9}{2 \cdot 0.9} = 0.05555$$

– коэффициент постоянных $a_{ред}$ и переменных $b_{ред}$ потерь редуктора;

$$\Delta M_{\text{с мех прив}} = a_{\text{мех}} \cdot M_{\text{гр ном прив}} + b_{\text{мех}} \cdot M_{\text{гр прив}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

– приведенный момент постоянных и переменных потерь механизма;

$$a_{\text{мех}} = b_{\text{мех}} = \frac{1 - \eta_{\text{мех ном}}}{2 \cdot \eta_{\text{мех ном}}} = \frac{1 - 0.86}{2 \cdot 0.86} = 0.0814$$

– коэффициент постоянных $a_{\text{мех}}$ и переменных $b_{\text{мех}}$ потерь механизма;

$$\begin{aligned} M_{\text{гр ном прив}} &= \frac{(m_{\text{гр ном}} + m_{\text{вт}} + m_{\text{нг}} + m_{\text{к}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot i_{\text{ред}}} = \\ &= \frac{(50000 + 5650 + 2227 + 1233.7) \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 4 \cdot 23.255} = 3771.5 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

– приведенный момент, развиваемый номинальным грузом $m_{\text{гр ном}} = 50 \text{ т}$.

Приведенный максимальный грузовой момент при заполненном вагоне

$$\begin{aligned} M_{\text{гр макс прив}} &= \frac{(m_{\text{в}} + m_{\text{гр}} + m_{\text{вт}} + m_{\text{нг}} + m_{\text{к}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot i_{\text{ред}}} = \\ &= \frac{[29500 + 24000 + 5650 + 2227 + 664] \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 4 \cdot 23.255} = 3958.465 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Приведенный минимальный грузовой момент при пустом вагоне

$$\begin{aligned} M_{\text{гр мин прив}} &= \frac{(m_{\text{в}} + m_{\text{вт}} + m_{\text{нг}} + m_{\text{к}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot i_{\text{ред}}} = \\ &= \frac{[29500 + 5650 + 2227 + 664] \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 4 \cdot 23.255} = 2427.17 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Приведенный грузовой момент, создаваемый грузозахватным приспособлением

$$\begin{aligned} M_{\text{гр хх прив}} &= \frac{(m_{\text{вт}} + m_{\text{нг}} + m_{\text{к}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot i_{\text{ред}}} = \\ &= \frac{[5650 + 2227 + 664] \cdot 9.81 \cdot 1.21}{2 \cdot 4 \cdot 23.255} = 544.95 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Результаты расчета по приведенным выражениям для эквивалентного двигателя:

– при подъеме

$$M_{\text{с под макс}} = 5036.2 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{с под мин}} = 3295.4 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{с под хх}} = 1154.8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– при спуске

$$M_{с\ сп\ макс} = 2880.1 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{с\ сп\ мин} = 1559 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{с\ сп\ хх} = -64.9 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где моменты потерь в редукторе и механизме определялись по выражениям:

$$\Delta M_{с\ средприв} = 226.93 + 0.05555 \cdot M_{грприв}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta M_{с\ мехприв} = 308.13 + 0.0817 \cdot M_{грприв}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

1.10 Построение области изменения моментов статической нагрузки на валу двигателя

Статическая нагрузка двигателя зависит от массы поднимаемого груза.

Моменты статических нагрузок одного двигателя в рабочем режиме:

– при подъеме

$$M_{с\ под1\ макс} = \frac{M_{с\ под\ макс}}{4} = \frac{5036.2}{4} = 1259 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с\ под1\ мин} = \frac{M_{с\ под\ мин}}{4} = \frac{3295.4}{4} = 823.8 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с\ под1\ хх} = \frac{M_{с\ под\ хх}}{4} = \frac{1154.8}{4} = 288.7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– при спуске

$$M_{с\ сп1\ макс} = \frac{M_{с\ сп\ макс}}{4} = \frac{2880.1}{4} = 720 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с\ сп1\ мин} = \frac{M_{с\ сп\ мин}}{4} = \frac{1559}{4} = 389.7 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с\ сп1\ хх} = \frac{M_{с\ сп\ хх}}{4} = \frac{-64.9}{4} = -16.2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{э\ кв1}^* = 888.5 \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ – расчетный эквивалентный момент статической}$$

нагрузки за цикл работы подъемника.

Статические нагрузки для одного двигателя при работе тремя двигателями:

$$M_{с\ под1\ макс}^* = \frac{M_{с\ под\ макс}}{3} = \frac{5036.2}{3} = 1678.7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{экв1}}^* = 1362.4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На основании полученных результатов расчета статических моментов на рисунке 10 построена область изменения статической нагрузки на валу двигателя.

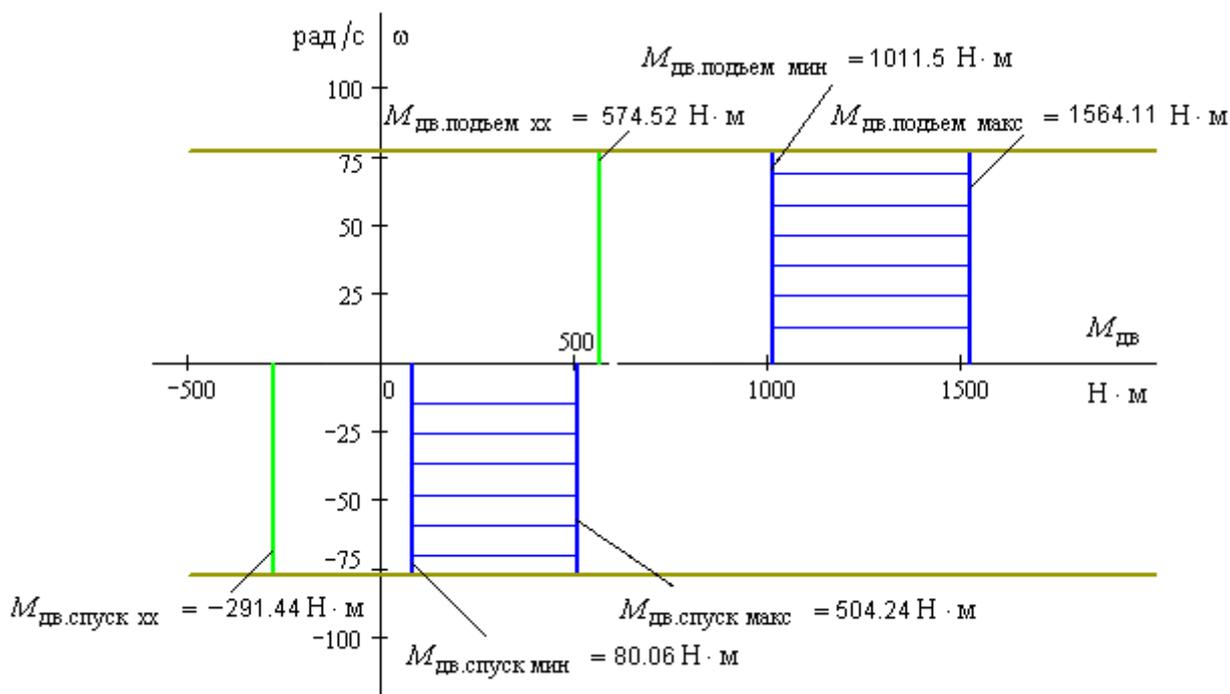


Рисунок 10 – Области изменения статической нагрузки на валу двигателя в зависимости от режима работы и массы груза

1.11 Определение приведенной эквивалентной угловой жесткости и резонансной частоты ДМС

Линейная жесткость одного погонного метра канат [11]

$$c_{\text{к}} = E_{\text{к}} \cdot s_{\text{к}} = 1.25 \cdot 10^{11} \cdot 4.0192 \cdot 10^{-4} = 5.024 \cdot 10^7 \text{ Н},$$

где

$$E_{\text{к}} = (1.1 \div 1.4) \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$$

– модуль продольной упругости для стального каната, принимаем

$$E_k = 1.25 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2;$$

$$s_k = \pi \cdot \left(\frac{d_k}{2} \right)^2 \cdot 0.5 = 3.14 \cdot \left(\frac{32 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \cdot 0.5 = 4.0192 \cdot 10^{-4}$$

– площадь сечения проволок каната, м².

Эквивалентная линейная жесткость канатного подвеса лебедки

$$c_{l_{\text{э}}} \approx 2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot \frac{c_k}{h_{\text{под}}}, \text{ Н/м},$$

где $h_{\text{под}}$ – высота подвеса, м.

Параметры канатного подвеса для одного полиспаста:

– рабочая длина каната с вычетом заправочного (1.5 витка) и запасного (1.5 витка) участков

$$l_{\text{раб}} = 160 - 2 \cdot 1.5 \cdot \frac{\pi \cdot D_6}{2} = 160 - 11.4 = 148.6 \text{ м};$$

– максимальная высота подвеса в нижнем положении

$$h_{\text{под макс}} = \frac{l_{\text{раб}}}{4} = \frac{148.6}{4} = 37.15 \text{ м};$$

– минимальная длина ветви каната в верхнем положении

$$h_{\text{под мин}} = h_{\text{под макс}} - H = 37.15 - 24.8 = 12.32 \text{ м}.$$

Эквивалентная линейная жесткость канатного подвеса:

– в нижнем положении

$$c_{l_{\text{э мин}}} = 2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot \frac{c_k}{h_{\text{под макс}}} = 2 \cdot 4 \cdot \frac{5.024 \cdot 10^7}{37.15} = 1.07787 \cdot 10^7 \text{ Н/м};$$

– в верхнем положении

$$c_{l_{\text{э макс}}} = 2 \cdot i_{\text{пол}} \cdot \frac{c_k}{h_{\text{под мин}}} = 2 \cdot 4 \cdot \frac{5.024 \cdot 10^7}{12.35} = 3.2544 \cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

Приведенная к валу двигателя эквивалентная угловая жесткость двухмассовой механической системы подъема:

– в нижнем положении

$$c_{\varphi 12 \text{э мин}} = c_{l \text{э мин}} \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{\text{ред}}^2} = 1.07787 \cdot 10^7 \cdot \frac{1.21^2 \cdot 1}{2^2 \cdot 23.255^2} = 7295.3 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}};$$

– в верхнем положении

$$c_{\varphi 12 \text{э макс}} = c_{l \text{э макс}} \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{\text{ред}}^2} = 3.2544 \cdot 10^7 \cdot \frac{1.21^2 \cdot 1}{2^2 \cdot 23.255^2} = 22026.7 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}.$$

Резонансная частота ДМС механизма подъема в общем случае определяется по выражениям:

$$\omega_{12} = \sqrt{c_{\varphi \text{э}} \cdot \frac{J_{1\text{э}} + J_{2\text{э}}}{J_{1\text{э}} \cdot J_{2\text{э}}}}, \text{ рад/с};$$

$$f_{12} = \frac{\omega_{12}}{2\pi}, \text{ Гц}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Наименьшие значения резонансной частоты при любом грузе имеют место в нижнем положении грузозахватного приспособления, а её минимальное значение будет при загруженном вагоне. Резонансная частота ДМС подъема в рабочем режиме изменяется в пределах $f_{12} = (8.94 \div 18.47)$ Гц. Таким образом, она лежит в интервале частот пропускания электропривода $f_{\text{рэл}} \geq 30$ Гц. По этой причине её учет необходим при настройке системы электропривода. Сложность решения задачи учета упругих колебаний определяется отсутствием характеристик демпферного устройства.

Таблица 3 – Расчетные значения резонансной частоты ДМС

Груз	Положение подъемного механизма			
	Нижнее		Верхнее	
	$\omega_{1,2}$	f_{12}	$\omega_{1,2}$	f_{12}
$m_{\text{гр}} + m_{\text{в}}$	56,16	8,94	93,05	14,81

$m_{гр} = 0$	70,04	11,15	116,04	18,47
--------------	-------	-------	--------	-------

1.12 Структурная схема механической системы электропривода подъема

При проектировании САР электропривода пользуются её полной структурной схемой и схемами отдельных функциональных элементов. Расчетной схема механической системы электропривода, представленной на рисунке 9, соответствует структурная схема ДМС, приведенная на рисунке 11 (без учета коэффициентов демпфирования). Параметры структурной схемы ДМС были определены ранее. Поскольку расчетным путем и моделированием определяется электромагнитный момент, а не момент на валу двигателя, эквивалентный момент трения должен определяться с учетом момента трения двигателя

$$\Delta M_{с1э} = 4 \cdot \Delta M_{сдв} + \Delta M_{с\text{сред прив}} + \Delta M_{с\text{мех прив}}$$

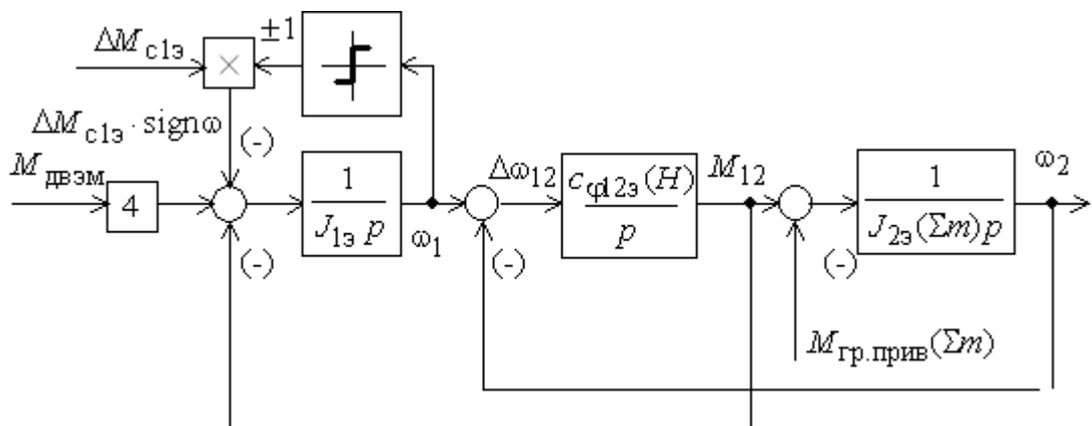


Рисунок 11 – Структурная схема ДМС электропривода подъема

Если податливостью элементов кинематической цепи подъема пренебречь, тогда структурная схема механической системы электропривода может быть упрощена и представлена в виде одномассовой механической системы (рисунок 12). Параметры структурной схемы ОМС:

$$J_э(\Sigma m) = J_{1э} + J_{2э}(\Sigma m);$$

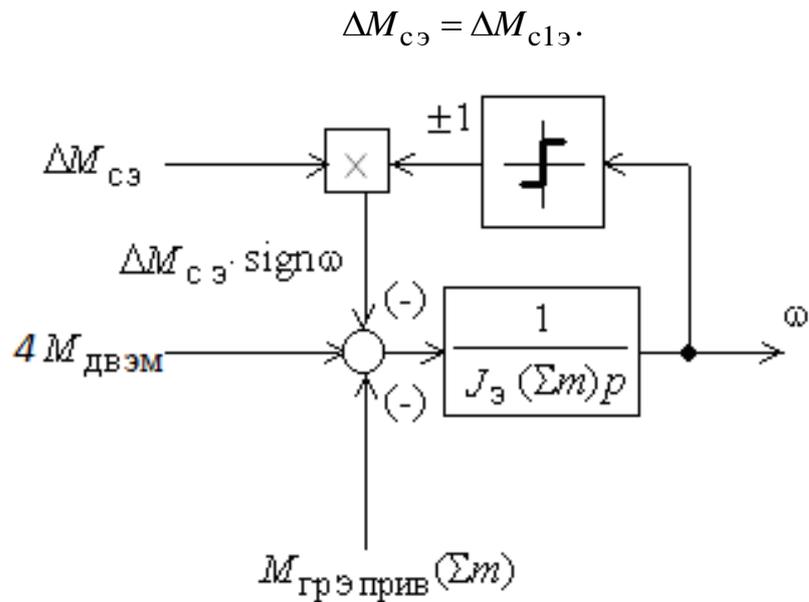


Рисунок 12 – Структурная схема ОМС электропривода подъема

2 Расчет параметров и характеристик электрической системы электропривода подъемной лебедки

2.1 Определение дополнительных параметров двигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104.71 \text{ рад/с.}$$

Номинальная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 988}{30} = 103.46 \text{ рад/с.}$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1000 - 988}{1000} = 0.012.$$

Номинальное фазное напряжение и фазный ток обмотки статора при схеме соединения обмоток Y:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ В}; I_{1фн} = I_{1лн} = 235 \text{ А.}$$

Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{132000}{103.46} = 1276 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный (критический) момент на валу двигателя

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{двн}} = 3 \cdot 1276 = 3828 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент на валу двигателя

$$M_{\text{пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 3.1 \cdot 1276 = 3955.6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный пусковой ток двигателя

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1\text{фн}} = 7.5 \cdot 235 = 1762.5 \text{ А}.$$

2.2 Расчёт параметров схемы замещения двигателя

В работе планируется реализация асинхронного электропривода подъемника с частотным векторным управлением, четырьмя двигателями и индивидуальными преобразователями частоты. При векторном управлении двигатель работает на рабочих участках механических и электромеханических характеристик, для расчета которых необходимо знать параметры схемы замещения двигателя, соответствующие его номинальному режиму работы.

Расчет параметров двигателя и его Т-образной схемы замещения (рисунок 13) для номинального режима работы выполним в соответствии с методикой, изложенной в [6, 8, 9], используя программу REP_AD_RL2 в среде *MathCad* [7].

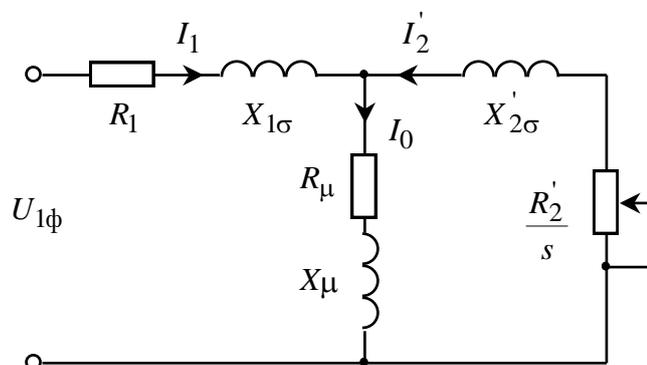


Рисунок 13 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Полученные при расчете параметры двигателя и схемы замещения:

$$\eta_{0.75} = 0.95; \cos\varphi_{0.75} = 0.825; \beta = 1.55;$$

$$R_1 = 0.02 \text{ Ом}; R_2' = 0.013 \text{ Ом};$$

$$L_{1\sigma} = 2.301 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}; L_{2\sigma}' = 3.108 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}; L_m = 8.80265 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$X_{кн} = 0.172 \text{ Ом}; X_{1\sigma} = 0.072 \text{ Ом};$$

$$X_{2\sigma}' = 0.098 \text{ Ом}; X_{\mu} = 2.765 \text{ Ом};$$

$$I_0 = 78.678 \text{ А}; \Psi_{2н} = 0.979 \text{ Вб}; M_{эм.н} = 1331 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$s_{красч.} = 0.076;$$

$$\Delta M_{с. дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 1331 - 1276 = 55 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

– момент трения на валу двигателя.

2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя

Расчетные значения момента двигателя соответствуют значениям его электромагнитного момента. Поэтому расчетные механические характеристики двигателя представляют собой зависимость скорости вращения от электромагнитного момента $\omega(M_{эм})$. Электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости $\omega(I_1)$ от тока статора. Естественные характеристики строятся при номинальной частоте $f_{1н} = 50 \text{ Гц}$ и номинальном напряжении $U_{1фн} = 230 \text{ В}$ двигателя.

Расчет естественных характеристик двигателя выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [6, 8, 9], используя программу REP_AD_Mtest в среде *MathCad* [7].

Расчетные естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя приведены, соответственно, на рисунках 14 и 15.

Рабочие участки механической и электромеханической характеристик двигателя характеризуются значениями $\omega_{дв}(M_{эм.н}) = 103.46 \text{ об/мин}$, $I_{1ф}(M_{эм.н}) = 234.65 \text{ А}$, что соответствует их номинальным значениям. Расчетное значение критического момента $M_{эм.к} = 3828 \text{ Н*м}$ определяет равенство отношения

$$\frac{M_{эм.к}}{M_{эм.н}} = \frac{3828}{1331} = 2,876,$$

что близко к паспортному значению $m_k = 3$. Это подтверждает верность значений найденных параметров двигателя и его схемы замещения и возможность их применения для расчетов процессов в двигателе при изменении частоты и его работе на скорости большей критической $\omega \geq \omega_k(f_1)$

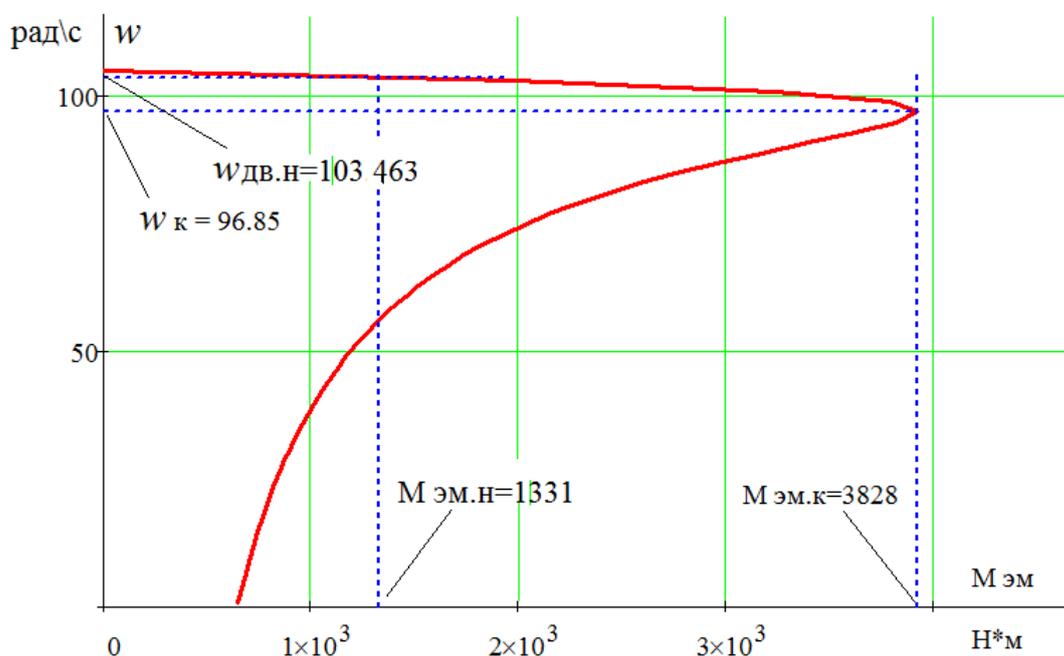


Рисунок 14 – Естественная механическая характеристика двигателя

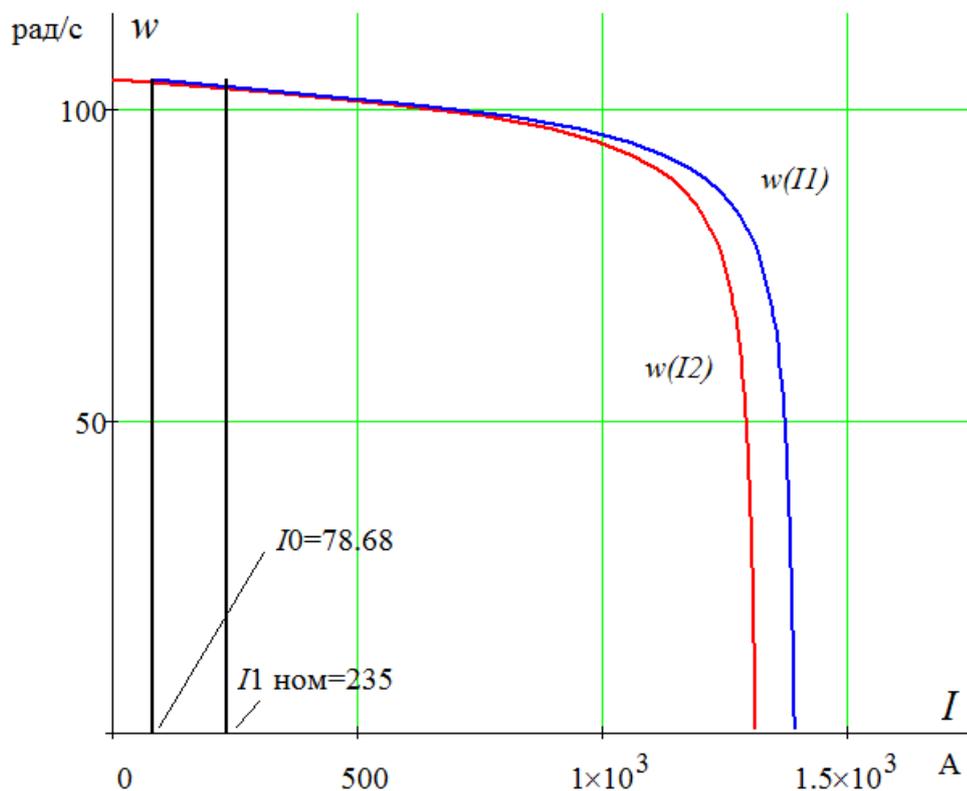


Рисунок 15 – Естественная электромеханическая характеристика

2.4 Построение области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя

Поскольку расчетные значения момента двигателя соответствуют значениям его электромагнитного момента, моменты нагрузки должны рассчитываться с учетом момента трения двигателя.

Определим электромагнитные моменты, соответствующие моментам статических нагрузок одного двигателя в рабочем режиме:

– при подъеме

$$M_{с \text{ под1эм макс}} = \frac{M_{с \text{ под макс}}}{4} + \Delta M_{с \text{ дв}} = \frac{5036}{4} + 55 = 1314 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с \text{ под1эм мин}} = \frac{M_{с \text{ под мин}}}{4} + \Delta M_{с \text{ дв}} = \frac{3295}{4} + 55 = 878.75 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с \text{ под1эм хх}} = \frac{M_{с \text{ под хх}}}{4} + \Delta M_{с \text{ дв}} = \frac{1154.8}{4} + 55 = 343.7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– при спуске

$$M_{с\ сп1эм\ макс} = \frac{M_{с\ сп\ макс}}{4} - \Delta M_{с\ дв} = \frac{2880}{4} - 55 = 665 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с\ сп1эм\ мин} = \frac{M_{с\ сп\ мин}}{4} - \Delta M_{с\ дв} = \frac{1559}{4} - 55 = 334.75 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с\ сп1эм\ хх} = \frac{M_{с\ сп\ хх}}{4} - \Delta M_{с\ дв} = \frac{-64.9}{4} - 55 = -71.2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{эқв1\ эм}^* = M_{эқв1}^* + \Delta M_{с\ дв} = 1021.2 + 55 = 1076.2 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{эквивалентный}$$

момент статической нагрузки за цикл работы подъемника.

Электромагнитные моменты, соответствующие моментам статических нагрузок одного двигателя при работе тремя двигателями:

$$M_{с\ под1эм\ макс}^* = \frac{M_{с\ под\ макс} + \Delta M_{с\ дв}}{3} + \Delta M_{с\ дв} = \frac{5036 + 55}{3} + 55 = 1752 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{эқв1\ эм}^* = \frac{4}{3} \cdot M_{эқв1\ эм}^* = \frac{4}{3} \cdot 1076.2 = 1434.9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для обеспечения выбранного значения максимального ускорения

$a = 0.5 \text{ м/с}^2$ двигатели совместно должны развивать динамический момент

$$\begin{aligned} M_{дин\ эқв\ макс} &\geq J_{э\ макс} \cdot \varepsilon_{макс} = (J_{1э} + J_{2э\ макс}) \cdot \varepsilon_{макс} = \\ &= (19.5 + 2.624) \cdot 76.876 = 1700.8 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

где

$$\varepsilon_{макс} = \frac{2 \cdot a_{макс}}{D_б} \cdot i_{ред} \cdot i_{пол} = \frac{2 \cdot 0.5}{1.21} \cdot 23.255 \cdot 4 = 76.876 \text{ рад/с}^2$$

– максимальное значение углового ускорения.

Динамический момент одного двигателя:

– в режиме работы четырьмя двигателями

$$M_{дин\ макс} \geq \frac{M_{дин\ эқв\ макс}}{4} = \frac{1700.8}{4} = 425.2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– в режиме работы тремя двигателями

$$M_{дин\ макс} \geq \frac{M_{дин\ эқв\ макс}}{3} = \frac{1700.8}{3} = 566.9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Требуемый максимальный момент двигателя для обеспечения максимального ускорения при подъеме груженого ковша:

– в режиме работы четырьмя двигателями

$$M_{\text{дв эм макс}} \geq M_{\text{с под1эм макс}} + M_{\text{дин макс}} = 1314 + 425.8 = 1739.8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– в режиме работы тремя двигателями

$$M_{\text{дв эм макс}}^* \geq M_{\text{с под1эм макс}}^* + M_{\text{дин макс}} = 1752 + 566.9 = 2318.9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Принимаем следующие значения максимального момента электропривода:

– электромагнитный $M_{\text{эп эм макс}} = 2500 \text{ Н} \cdot \text{м},$

– на валу двигателя $M_{\text{эп макс}} = M_{\text{эп эм макс}} - \Delta M_{\text{с дв}} = 2500 - 55 = 2445 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

Механические характеристики $M(\omega)$ двигателя и механизма приведены на рисунке 16, где $M_{\text{дв длит. доп}}(\omega)$ – характеристика длительно допустимого момента двигателя, соответствующая выражению [6]

$$M_{\text{длит. доп}}(\omega) = \begin{cases} M_{\text{дв.н}} \cdot \left[k + (1-k) \cdot \frac{\omega}{0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}} \right] & \text{при } \omega \leq 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ M_{\text{дв.н}} & \text{при } \omega > 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}, \end{cases}$$

где $k = 0.85$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе, значение которого принято в соответствии с рисунком 6.

2.5 Построение области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя

При частотном векторном управлении регулирование скорости вращения двигателя осуществляется при постоянном значении (как правило, номинальном) потокосцепления ротора двигателя $\Psi_{2dн} = \text{const}$. Это обеспечивается поддержанием постоянного значения составляющей тока $I_{1dн} = \text{const}$ двухфазной модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат α, β (см. раздел 3).

Переход от механических характеристик $M(\omega)$ двигателя и механизма к соответствующим им электромеханическим характеристикам $I(\omega)$ может быть осуществлен согласно выражениям:

$$I_{1\phi} = \frac{\sqrt{I_{1q}^2 + I_{1dн}^2}}{\sqrt{2}}, \text{ А,}$$

где

$$I_{1dн} = \sqrt{2} \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 78.678 = 111.2711, \text{ А;}$$

$$I_{1q} = \frac{M_{эм}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2н}} = \frac{M_{эм}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{8.80265 \cdot 10^{-3}}{9.11345 \cdot 10^{-3}} \cdot 3 \cdot 0.979} = \frac{M_{эм}}{4.25526}, \text{ А.}$$

Найденные значения токов, соответствующие моментам статических нагрузок одного двигателя:

– в режиме работы четырьмя двигателями

$$I_{с\text{ под макс}} = 232.1 \text{ А, } I_{с\text{ сп мин}} = 96.36 \text{ А, } I_{1\phi\text{ экв}} = 195.4 \text{ А, } I_{1\phi\text{ макс}} = 299.6 \text{ А;}$$

– в режиме работы тремя двигателями

$$I_{с\text{ под макс}}^* = 303 \text{ А, } I_{1\phi\text{ экв}}^* = 251.1 \text{ А, } I_{1\phi\text{ макс}}^* = 394.75 \text{ А.}$$

Электромеханические характеристики $I(\omega)$ двигателя и механизма приведены на рисунке 17, где $I_{дв\text{ длит. доп}}(\omega)$ – характеристика длительно допустимого тока двигателя, соответствующая $M_{дв\text{ длит. доп}}(\omega)$, и $I_{эп.макс} = 422.8 \text{ А}$ – значение максимального тока электропривода, соответствующее выбранному значению $M_{эп\text{ эм макс}} = 2500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и отношению

$$\frac{I_{эп.макс}}{I_{1\phi н}} = \frac{422.8}{235} = 1.8.$$

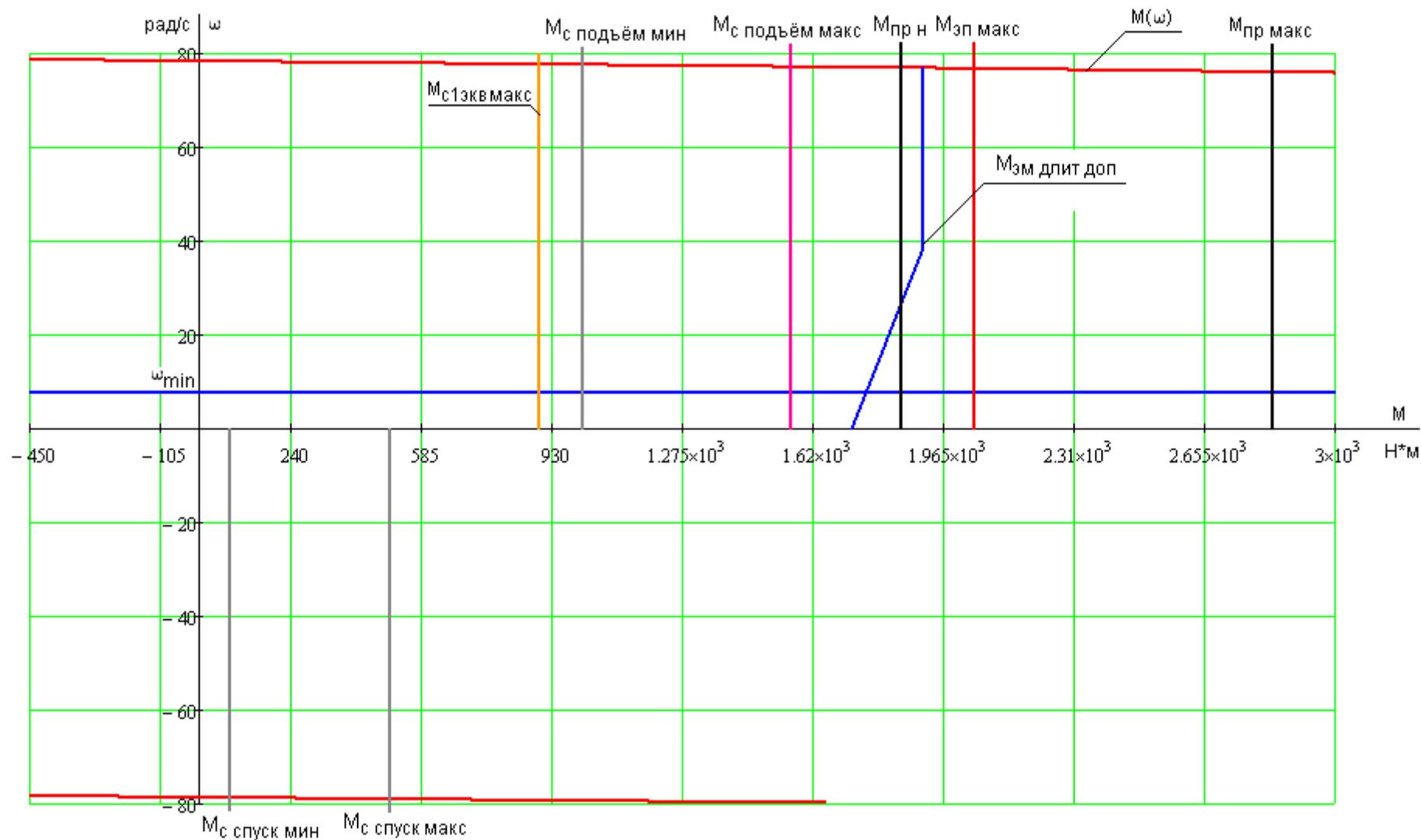


Рисунок 16 – Области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя

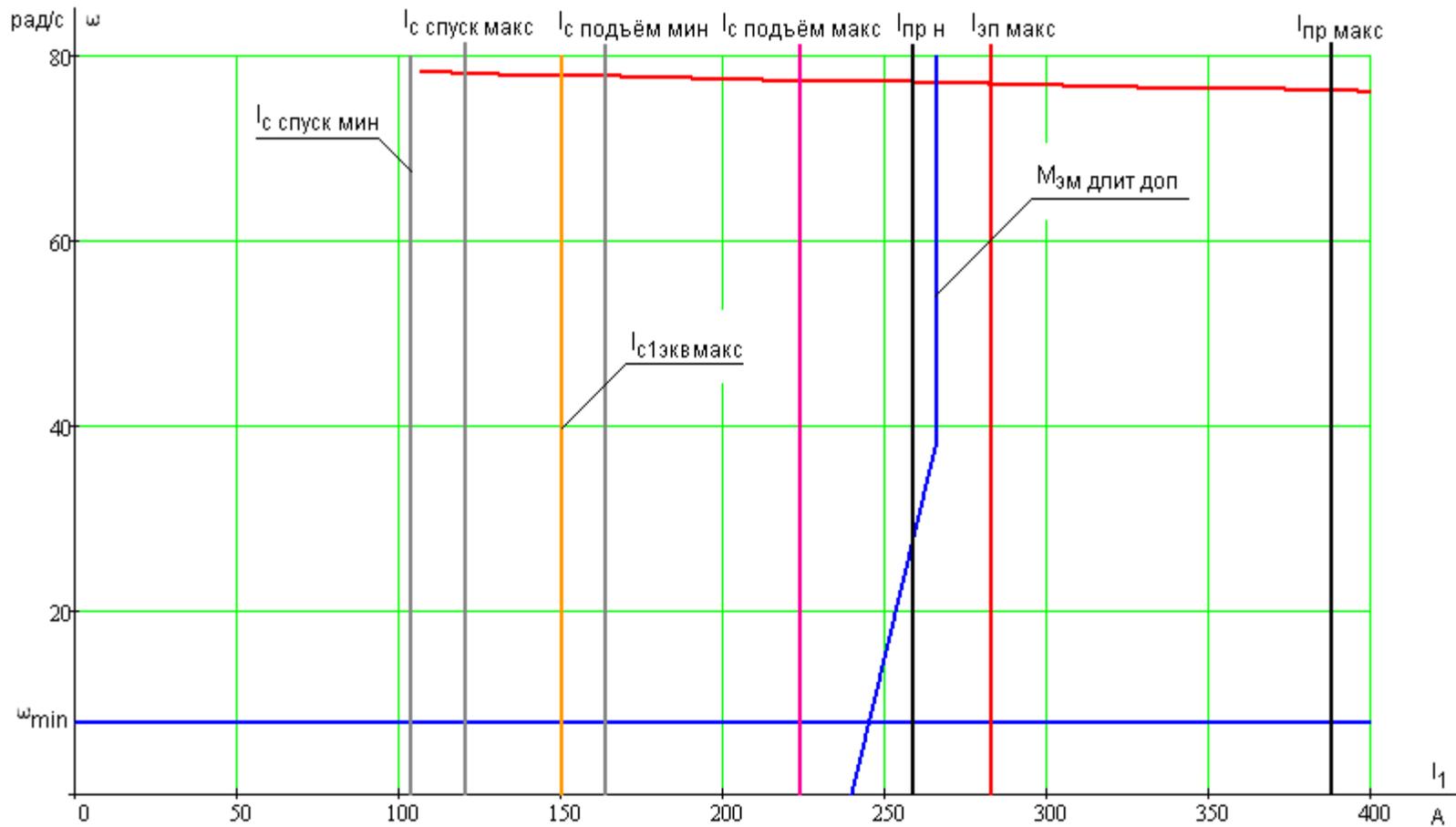


Рисунок 17 – Области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя

2.6 Выбор преобразователя частоты

Тип преобразователя частоты в общем случае выбирается с учетом следующих параметров: длительный ток нагрузки, ток кратковременной перегрузки, напряжение питающей сети и двигателя, диапазон регулирования выходной частоты, способы и законы частотного управления, набор комплектующих устройств (дополнительных блоков, расширяющих возможности привода), условия эксплуатации.

Сложность выбора преобразователя частоты для совместной работы с электродвигателем заключается в том, что номинальные режимы работы электродвигателей ($S1 - S8$), основанные на постоянной времени нагрева двигателя (десятками минут), не приемлемы для преобразователей, постоянная времени нагрева которых определяется десятками секунд.

Преобразователи частоты спроектированы для продолжительной работы с номинальным током инвертора $I_{ин}$. Если номинальный ток протекает длительное время (более 60 с), то рабочая температура блока достигает максимально допустимого значения, что не позволяет перегружать преобразователь по току даже кратковременно. По этой причине преобразователи частоты в системах электропривода, имеющих кратковременные перегрузки двигателя, должны работать с эквивалентным за цикл работы током, не превышающим номинальный ток инвертора $I_{ин} \geq I_{и экв}$, что при времени подъема более 60 секунд, практически означает $I_{и раб} \geq I_{с под макс}^*$.

Преобразователь частоты выбираем из следующих условий:

– питающая сеть: 3-х фазная, напряжение $380_{-10\%}^{+10\%}$ В, частота 50Гц;

– параметры нагрузки: 3-х фазная, максимальное выходное линейное напряжение 400В, максимальная выходная частота не менее 50Гц, номинальный ток инвертора $I_{и\text{ раб}} > I_{с\text{ под макс}}^* = 303$ А, максимальный ток инвертора $I_{и\text{ макс}} > I_{эп\text{ макс}} = 422.8$ А, возможность организации возврата энергии в сеть.

Выбираем преобразователь частоты типа Altivar 71 ATV 71HC16N4 фирмы Schneider Electric шкафного исполнения [Altivar]. Выбранный тип преобразователя разработан для систем векторного управления двигателями, поставляется с дросселем подключения к сети и может быть оснащен дополнительным блоком рекуперации W3 A7208. Технические данные преобразователя частоты приведены в таблице 4, предельные характеристики – на рисунке 18.

Таблица 4 – Технические данные преобразователя ATV 71HC16N4

Сеть	$P_{дв\ н}$, кВт	$U_{пр\ н}$, В	$I_{пр\ уст\ макс}$, А	$I_{пр\ макс}$, А 60 с/2 с
3х(380 ÷ 480)В	160	3х380	314	471/518
Исполнение защиты IP20				
Частота коммутации $f_{ш\text{им}} = (2.5 ÷ 8)$ кГц				

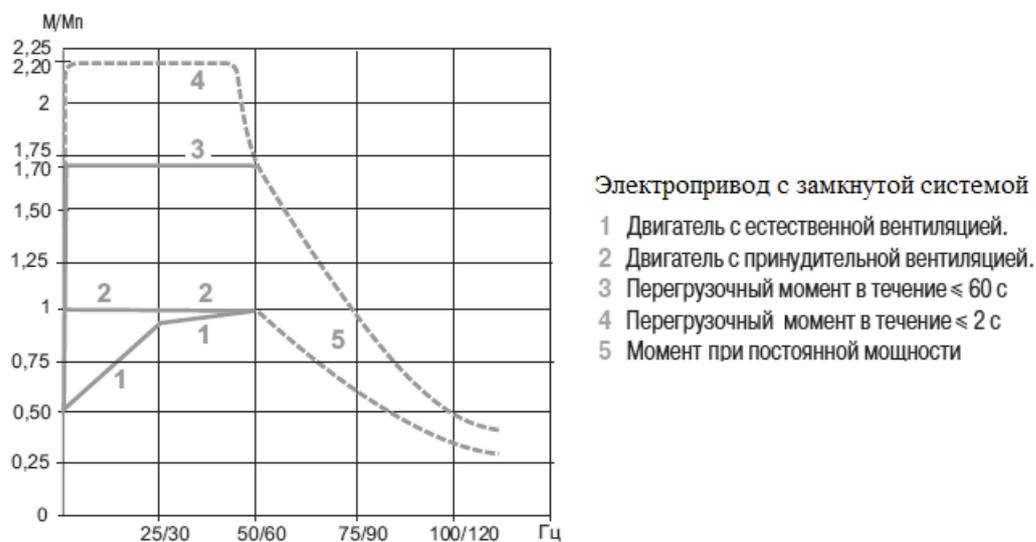


Рисунок 18 – Предельные характеристики преобразователя при работе с асинхронным двигателем

3 Разработка и исследование частотного векторного управления электропривода

3.1 Система управления электропривода

Для реализации системы управления асинхронного электропривода с частотным векторным управлением используется структурная схема двигателя во вращающейся двухфазной системе координат d q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Ψ_{2d} (рисунок 19). Такая модель двухфазного асинхронного двигателя позволяет оперировать не синусоидальными по форме, а постоянными величинами токов, напряжений и потокосцеплений, значения которых равны амплитудным значениям синусоидальных токов, напряжений и потокосцеплений двухфазного и трехфазного двигателя в неподвижной системе координат.

Если внутренние перекрестные связи в структурной схеме рисунка 19 не учитывать или в дальнейшем компенсировать, то структурная схема двигателя во вращающейся двухфазной системе координат d, q упрощается (рисунок 20) и оказывается весьма удобной для реализации системы управления координатами асинхронного двигателя. В этом случае электродвигатель как объект управления имеет два управляющих воздействия U_{1d}, U_{1q} и пять регулируемых координат двигателя: фазные токи I_{1d}, I_{1q} , потокосцепление ротора Ψ_{2d} , электромагнитный момент $M_{\text{дв эм}}$ и угловая скорость вращения $\omega_{\text{дв}}$.

3.2 Расчет параметров схемы замещения двигателя

Эквивалентная индуктивность обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 2.301 \cdot 10^{-4} + 8.80265 \cdot 10^{-3} = 9.03275 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Эквивалентная индуктивность обмотки ротора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 3.108 \cdot 10^{-4} + 8.80265 \cdot 10^{-3} = 9.11345 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния магнитного поля

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{(8.80265 \cdot 10^{-3})^2}{9.03275 \cdot 10^{-3} \cdot 9.11345 \cdot 10^{-3}} = 0.05871.$$

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

$$R_{1\sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L'_2{}^2} = 0.02 + 0.013 \cdot \frac{(8.80265 \cdot 10^{-3})^2}{(9.11345 \cdot 10^{-3})^2} = 0.03213 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0.05871 \cdot 9.03275 \cdot 10^{-3}}{0.03213} = 0.0165 \text{ с;}$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{9.11345 \cdot 10^{-3}}{0.013} = 0.7 \text{ с.}$$

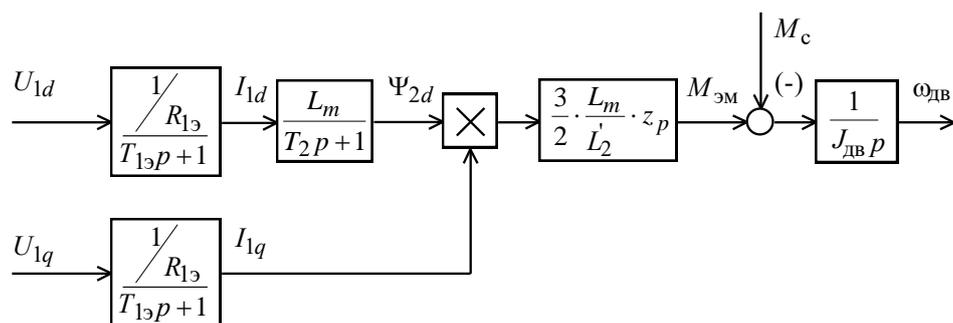


Рисунок 20 – Структурная схема двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q с компенсированными внутренними обратными связями

3.3 Выбор функциональной схемы электропривода

Системы векторного управления асинхронных электроприводов реализуются по структуре многоконтурных систем с подчиненным регулированием координат [4]. Система управления электропривода имеет четыре контура регулирования с индивидуальными ПИ-регуляторами: два контура тока I_{1d} и I_{1q} , контур потокосцепления ротора Ψ_{2d} и контур скорости вращения двигателя ω .

На основании рекомендаций, изложенных в [4, 5], принята функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением, приведенная на рисунке 21. На схеме звездочкой (*) обозначены заданные или расчетные управления. Схема предполагает однозонное регулирование скорости двигателя и управление скоростью от задатчика интенсивности, наличие аналоговых датчиков токов, импульсного датчика скорости и отсутствие датчиков потоков двигателя. Система управления инвертором представляет собой трехфазную синусоидальную ШИМ с введением в управляющие воздействия третьей гармоники. Коррекция управляющих сигналов на

входе инвертора в зависимости от напряжения звена постоянного тока осуществляется специальной схемой U_d -корректора.

Регулирование скорости электропривода механизма подъёма производится в первой зоне регулирования скорости приводных двигателей с номинальным значением потока двигателя. Определение потокосцепления ротора Ψ_{2d} и угла поворота координатной системы $\varphi_{\text{КС}}$ осуществляется наблюдателем потока, реализованным на основе модели двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат статора α, β . Схема наблюдателя приведена на рисунке 22.

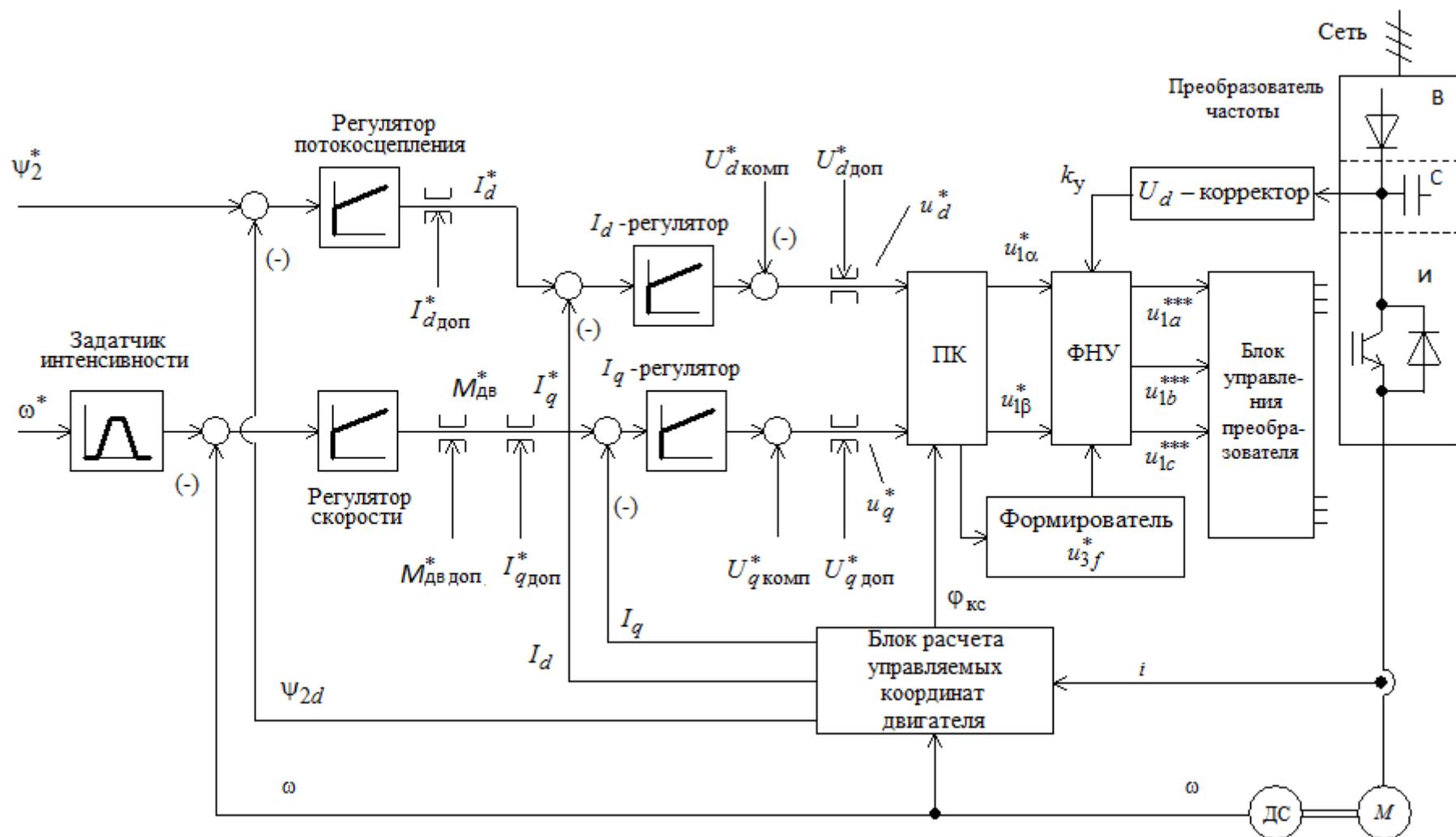


Рисунок 21 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

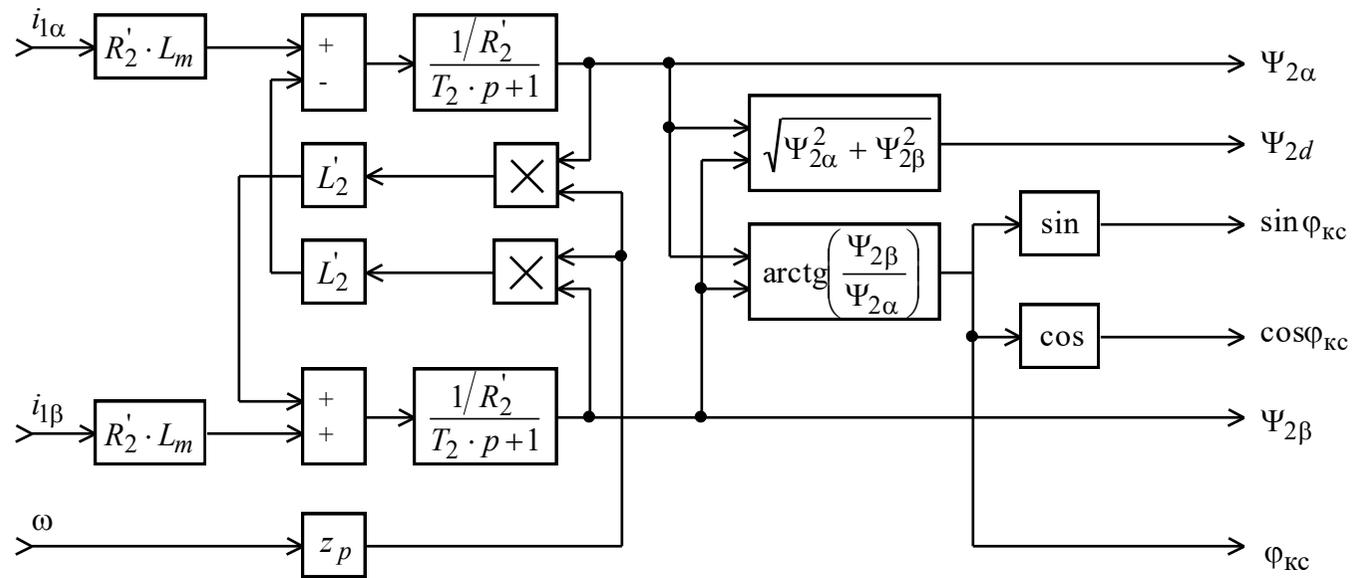


Рисунок 22 – Схема наблюдателя потокосцепления ротора

В системе электропривода исполнительный двигатель как объект управления представляет собой непрерывную систему, преобразователь частоты является дискретным устройством с периодом управления $T_{\text{ШИМ}}$, а система управления электропривода – цифровой. В цифровой системе управления электропривода расчет управлений осуществляется с квантованием по времени, измерение координат – с квантованием по времени и уровню. Измерение токов, скорости и расчет потокосцепления осуществляется за временной интервал квантования в цепи обратной связи $T_{\text{ос}}$, а расчет управлений – за временной интервал квантования в прямом канале контура $T_{\text{ПК}}$. Управление инвертором преобразователя осуществляется с задержкой на интервал времени $T_{\text{зу.и}}$.

Квантование по уровню при измерении токов определяется разрядностью АЦП $n_{\text{ацп}}$, а при измерении скорости – числом импульсов на оборот датчика угловых перемещений $n_{\text{дп}}$.

Сформированное регуляторами тока значение модуля вектора управления инвертором должно быть ограничено максимальным значением

$$\text{mod } \vec{u}_1^* = \sqrt{(u_{1d}^*)^2 + (u_{1q}^*)^2} \leq \text{mod } \vec{u}_{1\text{макс}}^*.$$

Если базовое значение максимальной амплитуды вектора управления инвертором принять из условия $\text{mod } \vec{u}_{1\text{макс}}^* = 1$, а в качестве приоритетного управления двухфазным двигателем выбрать управление по координате d , найдем ограничения выходных сигналов регуляторов тока:

$$U_{d\text{доп}}^* = 1; \quad U_{q\text{доп}}^* = \sqrt{1^2 - U_{d\text{доп}}^{*2}}.$$

Для ограничения тока (момента) двигателя значение модуля вектора тока статора должно быть ограничено максимально допустимым значением

$$\text{mod } \vec{I}_1 = \sqrt{I_{1d}^2 + I_{1q}^2} \leq \text{mod } \vec{I}_{1\text{макс}}.$$

Если базовое значение максимальной амплитуды вектора тока принять из условия $\text{mod } \vec{I}_{1\text{макс}} = 1$, а в качестве приоритетного выбрать ограничение тока по координате d , найдем ограничения выходных сигналов регуляторов потокосцепления и скорости:

$$I_{d\text{ доп}}^* = 1; \quad I_{q\text{ доп}}^* = \sqrt{1^2 - I_{d\text{ доп}}^{*2}}.$$

По формулам обратного преобразования координат рассчитываются управления двухфазным:

$$u_{1\alpha}^* = u_{1d}^* \cdot \cos \varphi_{\text{КС}} - u_{1q}^* \cdot \sin \varphi_{\text{КС}}; \quad u_{1\beta}^* = u_{1d}^* \cdot \sin \varphi_{\text{КС}} - u_{1q}^* \cdot \cos \varphi_{\text{КС}},$$

а затем трехфазным двигателем:

$$u_{1a}^* = u_{1\alpha}^*; \quad u_{1b}^* = -\frac{1}{2} \cdot u_{1\alpha}^* + \frac{\sqrt{3}}{2} u_{1\beta}^*; \quad u_{1c}^* = -\frac{1}{2} \cdot u_{1\alpha}^* - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{1\beta}^*.$$

В трехфазную систему управляющих инвертором сигналов $u_{1a}(t)$, $u_{1b}(t)$ и $u_{1c}(t)$ вводится общий для всех управлений сигнал третьей гармоники [11, раздел 15]

$$u_1^{**} = k \cdot (u_1^* + u_{3f}^*),$$

где $k = 1.1547$; $u_{3f1}^* = \frac{1}{6} \cdot u_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot 3f_1 \cdot t)$,

где u_{1m} – амплитуда управляющих сигналов.

Введение третьей гармоники и умножение результирующего сигнала на коэффициент $k = 1.1547$ приводит к увеличению значения

максимального выходного напряжения инвертора на 15.5% при неизменном напряжении сети.

Формирование напряжения третьей гармоники осуществляется в соответствии с выражением

$$u_{3f1} = -\frac{1}{6} \cdot u_{1\alpha} \cdot \frac{(u_{1\alpha})^2 - 3(u_{1\beta})^2}{(u_{1\alpha})^2 + (u_{1\beta})^2}.$$

Схема формирователя представлена на рисунке 23.

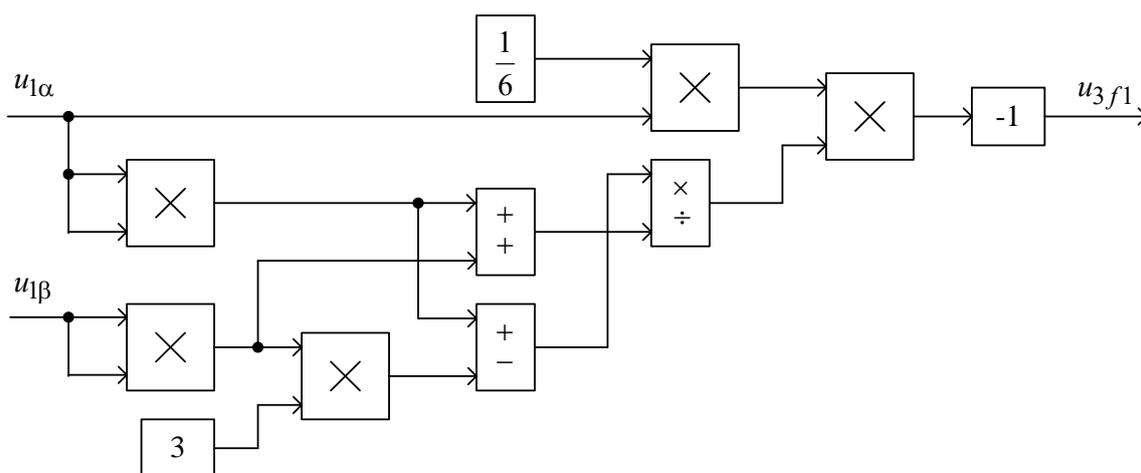


Рисунок 23 – Схема формирователя напряжения третьей гармоники

Для компенсации влияния изменения напряжения звена постоянного тока на значение выходного напряжения инвертора осуществляется коррекция сигналов управления инвертором

$$u_1^{***}(t) = k_y(U_d) \cdot u_1^{**}(t),$$

где

$$k_y(U_d) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}}{U_d}$$

– коэффициент коррекции блока U_d -корректора.

При повышенном напряжении звена постоянного тока напряжение инвертора автоматически будет ограничиваться на допустимом уровне $U_{\text{иф.доп}}$.

При изменении напряжения питающей сети управление инвертором результирующий коэффициент усиления системы управления и инвертора остается постоянным, а при повышенном напряжении сети напряжение инвертора ограничивается на допустимом уровне $U_{\text{иф.доп}}$.

Схема формирования коэффициента коррекции управления инвертором $k_y(U_d)$ представлена на рисунке 24.

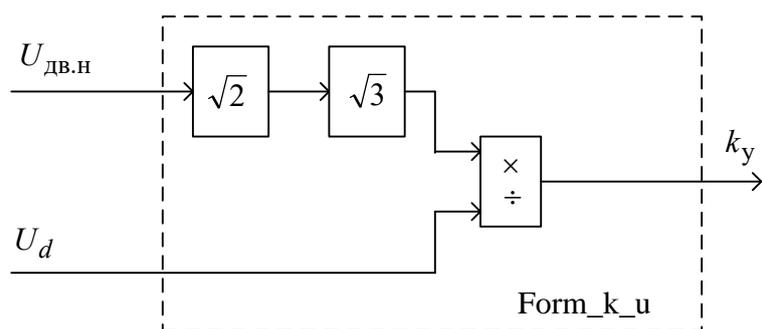


Рисунок 24 – Схема формирователя коэффициента коррекции управления инвертором

Полная схема формирования управлений трехфазным инвертором с синусоидальной ШИМ приведена на рисунке 25.

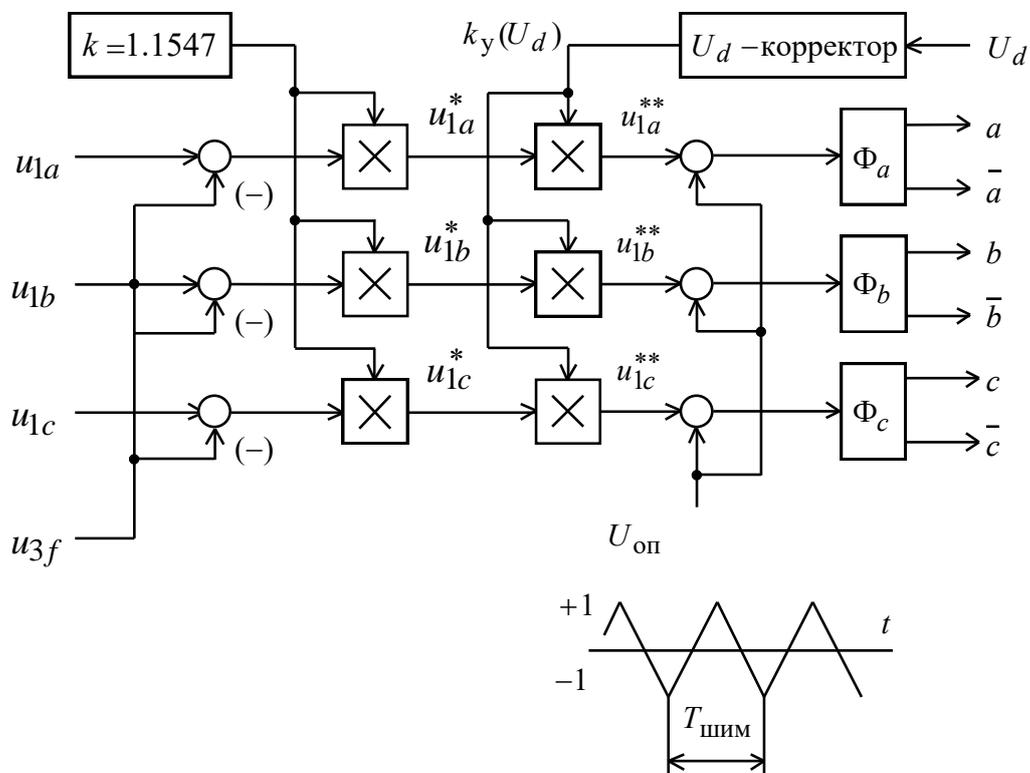


Рисунок 25 – Схема формирования сигналов управления трехфазным инвертором

3.4 Выбор и расчёт параметров преобразователя частоты

Принимаем частоту квантования инвертора $f_{\text{ШИМ}} = 5000 \text{ Гц}$, тогда период квантования $T_{\text{ШИМ}} = 1/f_{\text{ШИМ}} = 0.0002 \text{ с}$.

Напряжение питающей сети задано $U_{\text{сн}}^{+10\%} = 380 \text{ В}$, 50 Гц , тогда $U_{\text{смин}} = 342 \text{ В}$, $U_{\text{смакс}} = 418 \text{ В}$.

Параметры сетевого дросселя выбираем в соответствии с таблицей 5 для расчетного значения номинального тока обмотки фазы

$$I_{рфн} = I_{1фн} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1фн}}{U_c} = 235 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 230}{380} = 246.4 \text{ А.}$$

Таблица 5

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

Принимаем $R_p = 0.01 \text{ Ом}$, $L_p = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Принимаем $C = 100 \cdot 132 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ из условия

$C \approx (100 \div 300) \cdot P_n$, мкФ, где P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

Принимаем: $U_{d \text{ макс}} = U_{on} = 700 \text{ В}$, $U_{off} = 650 \text{ В}$ из условия

$$U_{off} > \sqrt{2} \cdot U_{c \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot 418 = 591.14 \text{ В} \text{ и } U_{on} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot U_{off}.$$

Напряжение звена постоянного тока (на конденсаторе) в зависимости от напряжения сети и тока инвертора и изменяется в пределах

$$\begin{aligned} U_d(U_c, I_{1ф}) &= k_{нсx} \cdot k_{нс} \cdot U_{сн} = (1.41 \div 1.35) \cdot (0.9 \div 1.1) \cdot 380 = \\ &= (589.4 \div 461.7) \text{ В}, \end{aligned}$$

где

$k_{нсx} = (1.41 \div 1.35)$ – коэффициент трехфазной мостовой схемы

выпрямления в зависимости от тока нагрузки;

$k_{nc} = (0.9 \div 1.1)$ – коэффициент, учитывающий изменения напряжения сети.

Максимальное значение напряжения инвертора зависит от напряжения звена постоянного тока и изменяется в пределах

$$U_{иф\max}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1ф})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} = \frac{(589.4 \div 461.7)}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} = (240.6 \div 188.5) \text{ В.}$$

Принимаем коэффициент преобразования напряжений управления инвертором, найденных регуляторами тока $k_{преоб} = 1$, тогда коэффициента усиления инвертора в зависимости от напряжения сети и нагрузки двигателя изменяется в пределах

$$k_{и}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1ф})}{\sqrt{3}} = \frac{(589.4 \div 461.7)}{\sqrt{3}} = (266.6 \div 340.3).$$

Ограничим максимальное значение напряжения инвертора на уровне допустимого значения

$$U_{иф.\max}(U_d) = U_{иф.\доп} = 1.05 \cdot U_{1фн} = 1.05 \cdot 230 = 241.5 \text{ В.}$$

С учетом работы U_d -корректора коэффициент усиления преобразователя частоты будет поддерживаться постоянным вне зависимости от напряжения звена постоянного тока

$$k_{пр} = k_{преоб} \cdot k_{у}(U_d) \cdot k_{и}(U_d) = \sqrt{2} \cdot U_{иф\ доп} = \sqrt{2} \cdot 241.5 = 341.5.$$

Определяем максимальное значение угловой скорости вращения двигателя при работе с номинальным потоком, номинальным моментом нагрузки и пониженным напряжением сети

$$\omega_{эп.\max}^*(U_{с\min}) = \omega_{дв.н} \cdot \frac{U_{иф.\max}(U_{с\min})}{U_{иф\ доп}} = 103.46 \cdot \frac{188.5}{241.5} = 80.75 \text{ рад/с.}$$

Таким образом, при пониженном напряжении сети преобразователь обеспечивает требуемое значение максимальной

скорости приводного двигателя подъемной лебедки

$$\omega_{\text{эл макс}} = 76.876 \text{ рад/с без ослабления потока.}$$

3.5 Выбор и расчет параметров системы управления электропривода

В цифровых системах управления электропривода все операции в контурах регулирования координат выполняются последовательно в реальном времени, и их расчет занимает значительную часть интервала времени ШИМ, что определяет квантованный по времени характер расчетных значений на выходе регулятора контура. По этим причинам при настройке контура необходимо обеспечить следующие условия:

– принять равными временные интервалы квантования сигналов в прямом канале и в цепи обратной связи контура тока $T_{\text{ПК}} = T_{\text{ос}} = T_{\text{к}}$;

– расчеты в цепи обратной связи и прямом канале контура осуществлять в течение одного интервала квантования $T_{\text{к}}$;

– интервал квантования контура $T_{\text{к}}$ должен быть кратным интервалу времени ШИМ.

Полученные в контуре выходные расчетные значения остаются неизменными на протяжении всего временного интервала квантования $T_{\text{к}}$.

Основным элементом контуров регулирования координат двигателя является цифровой ПИ-регулятор. Цифровые ПИ-регуляторы формируют управления в соответствии с выражением

$$N_{\text{рег}i} = N_{i-1}^{\text{И}} + k_{\text{рег}} \cdot N_{\text{вх}i} \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{ПК}}}{T_{\text{рег}}}\right).$$

Пропорциональная составляющая рассчитывается на начало интервала квантования $T_{\text{ПК}}$, а приращение интегральной составляющей – на конец интервала, т.е. с опережением относительно первой.

Прекращение интегрирования при насыщении регулятора происходит на следующем интервале квантования. Схема цифрового ПИ-регулятора приведена на рисунке 26.

При обработке больших входных сигналов регулятор некоторое время находится в насыщении. Характер переходного процесса после выхода регулятора из насыщения определяется значением его интегральной составляющей в этот момент. Поэтому значение интегральной составляющей в этот момент должно соответствовать заданному значению тока. Это достигается в схемах ПИ-регуляторов с управляемым значением интегральной составляющей (рисунок 27).

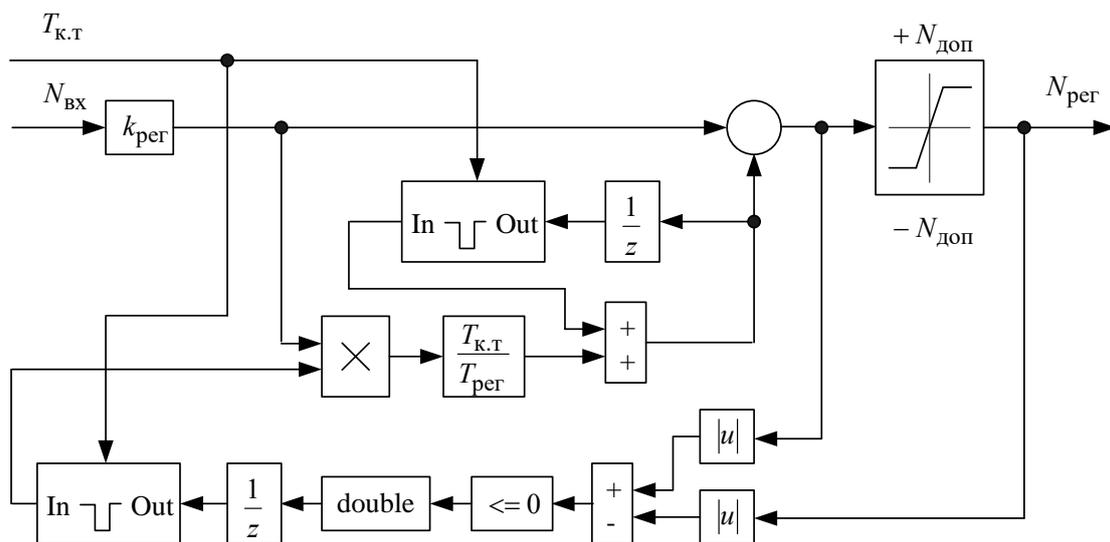


Рисунок 26 – Схема цифрового ПИ-регулятора тока с отключением интегральной составляющей при ограничении выходного сигнала

3.6 Выбор и расчет параметров настройки контуров тока

Быстродействие асинхронного электропривода с частотным векторным управлением полностью определяется быстродействием внутреннего контура тока. Поэтому при настройке контура тока необходимо стремиться обеспечить следующие условия:

– принять равными временные интервалы квантования сигналов в прямом канале и в цепи обратной связи контура тока $T_{пк.т} = T_{ос.т} = T_{к.т}$;

– принять значение временного интервала квантования в контуре тока равным периоду ШИМ $T_{к.т} = T_{шим}$;

– измерение и оцифровку токов двигателя, вычисление токов двухфазной модели асинхронного двигателя I_{1d}, I_{1q} , расчет регуляторов тока и расчет управлений на входе блока ШИМ инвертора осуществлять непосредственно после обновления управлений на входе контуров тока в течение одного интервала времени $T_{к.т}$;

– полученные расчетные значения оставлять неизменными на протяжении всего временного интервала квантования сигналов $T_{к.т}$ в контуре тока.

После расчета регуляторов тока и управлений инвертором на временном интервале $T_{к.т}$ процесс управления ключами может быть осуществлен только на следующем временном интервале $T_{шим}$. Таким образом, всегда имеет место временная задержка управления ключами $T_{зу.и} > 0$ после расчетов в контуре тока. Если обновление управлений на входе контура тока синхронизировано с периодом ШИМ инвертора, такая задержка происходит на целый интервал квантования $T_{зу.и} = T_{к.т}$.

Расчет параметров настройки контуров тока

Контуров токов I_{1d} и I_{1q} идентичные. Максимальный ток электропривода $I_{\text{эл.макс}} = 422.8$ А.

Значение эквивалентной малой постоянной времени контура тока определяем по выражению

$$T_{\text{мтэ}} = n_{\text{т}} \cdot \frac{T_{\text{к.т}}}{2} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}},$$

где коэффициент $n_{\text{т}}$ выбирается для электроприводов промышленных механизмов из условия $n_{\text{т}} = (2 \div 3)$.

Необходимость аналоговых фильтров в цепи датчиков тока и цифровых фильтров в цепи обратной связи контура тока может быть определена только практически, потому принимаем $T_{\text{ф.от}} = 0$.

Принимаем $n_{\text{ацп.дт}} = 10$.

Принимаем максимальное значение измеряемого тока

$$I_{\text{изм.макс}} = 700 \text{ А из условия}$$

$$I_{\text{изм.макс}} \geq \sigma_{\text{т}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эл.макс}} = 1.15 \cdot \sqrt{2} \cdot 422.8 = 686.62 \text{ А, где}$$

коэффициент $\sigma_{\text{т}} = 1.15$ учитывает возможное перерегулирование тока.

Коэффициент передачи датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дт}}}}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{512}{700} \text{ 1/А.}$$

Принимаем максимальное базовое значение сигнала обратной связи $N_{\text{от.макс}} = 1$.

Коэффициент обратной связи по току

$$k_T = \frac{1}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{700} \text{ 1/A.}$$

Коэффициент согласования сигналов на входе регулятора тока

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{апп.дт}}}} = \frac{1}{512}.$$

Максимальное значение задания на входе регулятора тока

$$N_{\text{зт.макс}} = k_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эл.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{эл.макс}}}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 422.8}{700} = 0.8542.$$

Принимаем $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{к.т}}$.

Принимаем $T_{\text{к.т}} = T_{\text{шим}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$

Принимаем $T_{\text{зу.и}} = T_{\text{к.т}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$

Принимаем $n_{\text{тд}} = n_{\text{тq}} = n_T = 1.$

Тогда эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$\begin{aligned} T_{\text{мтдэ}} = T_{\text{мтqэ}} = T_{\text{мтэ}} &= n_T \cdot \frac{T_{\text{к.т}}}{2} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \\ &= 3 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2} + 2 \cdot 10^{-4} + 0 = 5 \cdot 10^{-4}, \text{ с.} \end{aligned}$$

Принимаем коэффициент оптимизации контура на МО $a_T = 2.$

Постоянная времени регуляторов тока

$$T_{\text{рtd}} = T_{\text{ртq}} = T_{1э} = 0.0165 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регуляторов тока

$$k_{\text{рtd}} = k_{\text{ртq}} = \frac{T_{1э} \cdot R_{1э}}{k_{\text{пр}} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\text{мтэ}}} = \frac{0.0165 \cdot 0.03213 \cdot 700}{341.5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 1.086.$$

Эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока:

$$T_{\text{тд}} = a_T \cdot T_{\text{мтдэ}} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ с,}$$

$$T_{\text{тq}} = a_T \cdot T_{\text{мтqэ}} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Коэффициент компенсационной отрицательной обратной связи регулятора тока I_d

$$k_{\text{комп. } d} = (\sigma \cdot L_1 \cdot z_p) \cdot \frac{I_{\text{изм.макс}} \cdot \omega_{\text{изм.макс}}}{k_{\text{пр}}} =$$

$$= (0.05871 \cdot 0.00903275 \cdot 3) \cdot \frac{700 \cdot 100}{341.5} = 0.3261.$$

Коэффициент компенсационной положительной обратной связи регулятора тока I_q

$$k_{\text{комп. } q} = \left(\frac{L_m}{L'_2} + \sigma \cdot \frac{L_1}{L_m} \right) \cdot \Psi_{2H} \cdot z_p \cdot \frac{\omega_{\text{изм.макс}}}{k_{\text{пр}}} =$$

$$= \left(\frac{0.00880265}{0.00911345} + 0.05871 \cdot \frac{0.00903275}{0.00880265} \right) \cdot 0.979 \cdot 3 \cdot \frac{100}{341.5} = 0.88251.$$

Ограничение выходного сигнала регулятора тока I_d

$$N_{\text{рtd доп}} = 1.$$

Ограничение выходного сигнала регулятора тока I_q

$$N_{\text{ртq доп}} = \sqrt{1^2 - N_{\text{рtd}}^2}.$$

3.7 Выбор и расчет параметров настройки контура потокосцепления ротора

Расчет потокосцепления ротора Ψ_{2d} осуществляется наблюдателем потока, схема которого приведена на рисунке 22. Принимаем интервал расчета потокосцепления $T_{\text{расч.}\Psi} = T_{\text{шмм}} = 2 \cdot 10^{-4}$ с. Фильтр в цепи обратной связи отсутствует. Значение эквивалентной малой постоянной времени контура тока определяем по выражению

$$T_{\mu\Psi\text{э}} = T_{\text{Td}} + \frac{T_{\text{ос.}\Psi}}{n_{\Psi}},$$

где коэффициент n_{Ψ} выбирается из условия $n_{\Psi} \geq 1$.

Расчет параметров настройки контура потокосцепления

Номинальное значение потокосцепления ротора $\Psi_{2\text{н}} = 0.979$ Вб.

Принимаем коэффициент обратной связи по потоку

$$k_{\Psi} = 1 \text{ 1/Вб},$$

что соответствует $k_{\text{д}\Psi} = 1$, $k_{\text{ос.}\Psi} = 1$, тогда максимальное значение задания на входе регулятора потока

$$N_{\text{з}\Psi\text{ макс}} = \Psi_{2\text{н}} = 0.979.$$

Принимаем $T_{\text{ос.}\Psi} = T_{\text{пк.}\Psi} = T_{\text{к.}\Psi}$.

Принимаем $T_{\text{к.}\Psi} = 2 \cdot 10^{-3}$ с.

Принимаем $n_{\Psi} = 2$.

Тогда эквивалентная малая постоянная времени контура потока

$$T_{\mu\Psi\text{э}} = T_{\text{Td}} + \frac{T_{\text{ос.}\Psi}}{n_{\Psi}} = 10 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Принимаем коэффициент оптимизации контура на МО $a_{\Psi} = 2$.

Постоянная времени регулятора потока

$$T_{\text{р}\Psi} = T_2 = 0.7 \text{ с};$$

Коэффициент усиления регулятора потока

$$k_{\text{р}\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\text{T}}}{L_m \cdot k_{\Psi} \cdot a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi\text{э}}} = \frac{0.7 \cdot 1}{700 \cdot 0.00880265 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.002} = 28.4.$$

Ограничение выходного сигнала регулятора потокосцепления

$$N_{p\Psi \text{ доп}} = N_{зт. макс} = 0.8542.$$

3.8 Выбор и расчет параметров настройки контура скорости

Для измерения скорости вращения двигателя используется встроенный импульсный преобразователь угловых перемещений с числом импульсов 1024, а с учетом учетверения – 4096 импульсов на оборот вала двигателя. Скорость вращения двигателя определяется как отношение приращения угла поворота вала φ к интервалу измерения $T_{\text{изм.с}}$

$$\omega_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{T_{\text{изм.с}}}.$$

Необходимость цифрового фильтра в цепи обратной связи контура скорости может быть определена только практически.

Расчет параметров контура скорости

Максимальная скорость электропривода $\omega_{\text{эп.макс}} = 76.876$ рад/с.

Принимаем максимальное значение измеряемой скорости

$\omega_{\text{изм.макс}} = 100$ рад/с из условия

$$\omega_{\text{изм.макс}} \geq \sigma_c \cdot \omega_{\text{эп.макс}} = 1.2 \cdot 76.876 = 92.25 \text{ рад/с, где}$$

коэффициент $\sigma_c = 1.2$ учитывает возможное перерегулирование скорости.

Коэффициент передачи импульсного датчика

$$k_{\text{идс}} = \frac{n_{\text{дс}}}{2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 2500}{2 \cdot \pi}, 1/\text{рад.}$$

Принимаем интервал измерения скорости $T_{\text{изм.с}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с (частота расчета 250 Гц), тогда коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{\text{дс}} = k_{\text{идс}} \cdot T_{\text{изм.с}} = \frac{4 \cdot 2500 \cdot 4}{2\pi \cdot 1000} = \frac{4 \cdot 2500}{2\pi \cdot 250} \text{ с/рад.}$$

Принимаем максимальное базовое значение сигнала обратной связи

$$N_{\text{ос.макс}} = 1.$$

Тогда коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{\text{с}} = \frac{1}{\omega_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ с/рад.}$$

Коэффициент согласования сигналов на входе регулятора скорости

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{изм.с}} \cdot \omega_{\text{изм.макс}} \cdot n_{\text{дс}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{4 \cdot 100 \cdot 2500} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 250}{100 \cdot 2500}.$$

Максимальное значение задания на входе регулятора скорости

$$N_{\text{зс.макс}} = k_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{эп.макс}} = 0.01 \cdot 76.876 = 0.76876.$$

Принимаем $T_{\text{ос.с}} = T_{\text{пк.с}} = T_{\text{к.с}}$.

Принимаем $T_{\text{к.с}} = 4 \cdot 10^{-3}$ с (частота расчета 250 Гц).

Принимаем $T_{\text{ф.ос}} = 0$.

Принимаем $n_{\text{с}} = 2$.

Тогда эквивалентная малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\text{мсэ}} = T_{\text{тq}} + \frac{T_{\text{изм.с}} + T_{\text{ос.с}}}{n_{\text{с}}} + T_{\text{ф.ос}} = 10 \cdot 10^{-4} + \frac{4 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3}}{2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Принимаем коэффициенты настройки контура на СО $b_{\text{с}} = a_{\text{с}} = 2$.

Постоянная времени регулятора скорости

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\epsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{(J_{1\epsilon} + J_{2\epsilon \text{ макс}}) \cdot k_T}{4 \cdot \Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\epsilon}} =$$

$$= \frac{(19.5 + 2.624) \cdot 1 \cdot 100}{4 \cdot 700 \cdot 0.979 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.00880265}{0.00911345} \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 18.57.$$

Ограничение выходного сигнала регулятора скорости

$$N_{pc. \text{ доп}} = \sqrt{N_{\text{эт. макс}}^2 - N_{p\psi}^2} = \sqrt{0.8542^2 - N_{p\psi}^2}.$$

Принимаем постоянную времени фильтра на входе контура скорости

$$T_{ф.вх} = T_{pc} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

3.9 Выбор и расчет параметров настройки задатчика скорости

Принимаем задатчик интенсивности скорости с S-образной симметричной выходной характеристикой (рисунок 29). Такой задатчик позволит одновременно ограничить первую – ускорение и вторую – рывок производные скорости, что особенно важно с учетом наличия канатного подвеса в кинематике подъемника.

Задатчик скорости определяет полное время пуска электропривода до максимальной скорости $\omega_{\text{эл. макс}} = 76.876 \text{ рад/с}$

$$t_{\text{пуск}} = t_1 + t_2 + t_1 = 0.2 + 0.8 + 0.2 = 1.2 \text{ с,}$$

где

$$t_1 = a_{\text{макс}} / \left(\frac{d^2 v}{dt^2} \right)_{\text{макс}} = 0.5 / 2.5 = 0.2 \cdot \text{с};$$

$$t_2 = \frac{v_{\text{макс}}}{a_{\text{макс}}} - t_1 = \frac{0.5}{0.5} - 0.2 = 0.8 \text{ с};$$

$$\left(\frac{d^2 v}{dt^2} \right)_{\text{макс}} = 2.5 \frac{\text{м}}{\text{с}^3}$$

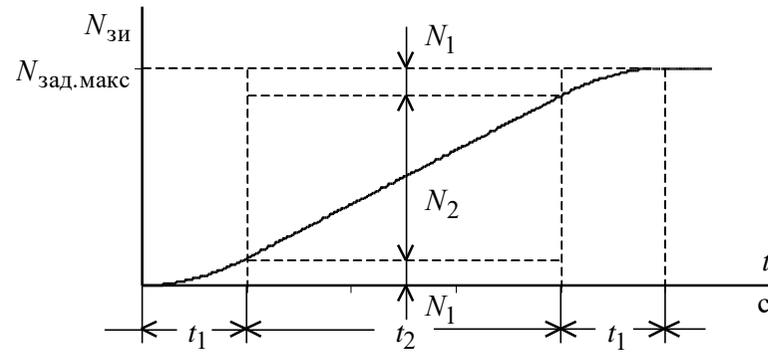
– предварительно принятое значение второй производной скорости.

Расчет параметров задатчика интенсивности скорости

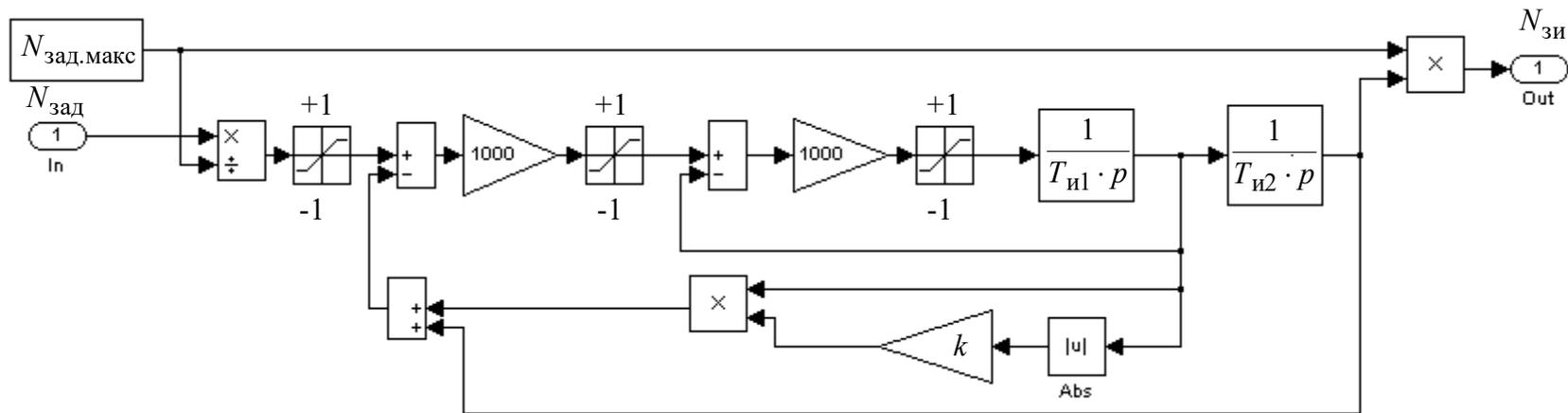
Параметры настройки задатчика интенсивности скорости определяются по выражениям:

$$T_{\text{и1}} = t_1 = 0.2 \text{ с}; \quad T_{\text{и2}} = t_1 + t_2 = 0.2 + 0.8 = 1 \text{ с};$$

$$k = 0.5 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2} = 0.5 \cdot \frac{0.2}{0.2 + 0.8} = 0.1.$$



а



б

Рисунок 29 – Задатчик скорости с S-образной характеристикой: а – выходная характеристика; б – схема

3.10 Разработка и исследование имитационной модели электропривода подъемной лебедки

3.10.1 Разработка имитационной модели электропривода

При разработке имитационной модели электропривода использованы рекомендации и базовые модели электропривода, приведенные в [4, раздел 7, 5]. Моделирование осуществлено в среде *MATLAB + Simulink* версия *MATLAB 7.11 (R2010b)*.

Полная схема набора имитационной модели электропривода приведена на рисунке 30. В состав полной модели электропривода входит модель силового канала, модель системы автоматического управления, задатчики управляющих (скорости) воздействий (ступенчатой и синусоидальной формы) и возмущающих воздействий (момент статической нагрузки), осциллографы Scope и записывающие устройства simout.

Модель силового канала электропривода включает в себя модели следующих силовых элементов:

- источник трехфазного переменного тока неограниченной мощности;
- реактор на стороне питающей сети;
- неуправляемый диодный выпрямитель;
- конденсатор в звене постоянного тока;
- инвертор напряжения на *IGBT* транзисторах;
- цепь разряда конденсатора, состоящая из тормозного резистора и транзисторного ключа;
- трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- одномассовая механическую систему.

Схема набора модели системы векторного управления электропривода SAU_VECT_REP приведена на рисунке 30 и включает в себя:

- блок системы управления электропривода SAU_REP;
- блок U_d -корректора Form_k_u;
- блок управления потокосцеплением ротора Form_k_psi;
- преобразователь координат двигателя и формирователь сигналов управления блоком синусоидальной ШИМ РК_1.

Схема набора модели блока системы управления электропривода SAU_REP приведена на рисунке 31 и включает в себя:

- блок системы регулирования потокосцепления ротора SAP_Psi;
- блок системы регулирования скорости двигателя SAP_W;
- преобразователь координат РК_2;
- блок измерения и расчета координат Subsystem1.

Схемы набора блоков систем регулирования потокосцепления SAP_Psi и скорости SAP_W, блока измерения и расчета координат Subsystem1 приведены, соответственно, на рисунках 32 – 34.

Регуляторы токов I_{1d} и I_{1q} реализованы по схеме рисунка 26, а регуляторы потокосцепления и скорости – по схеме рисунка 27.

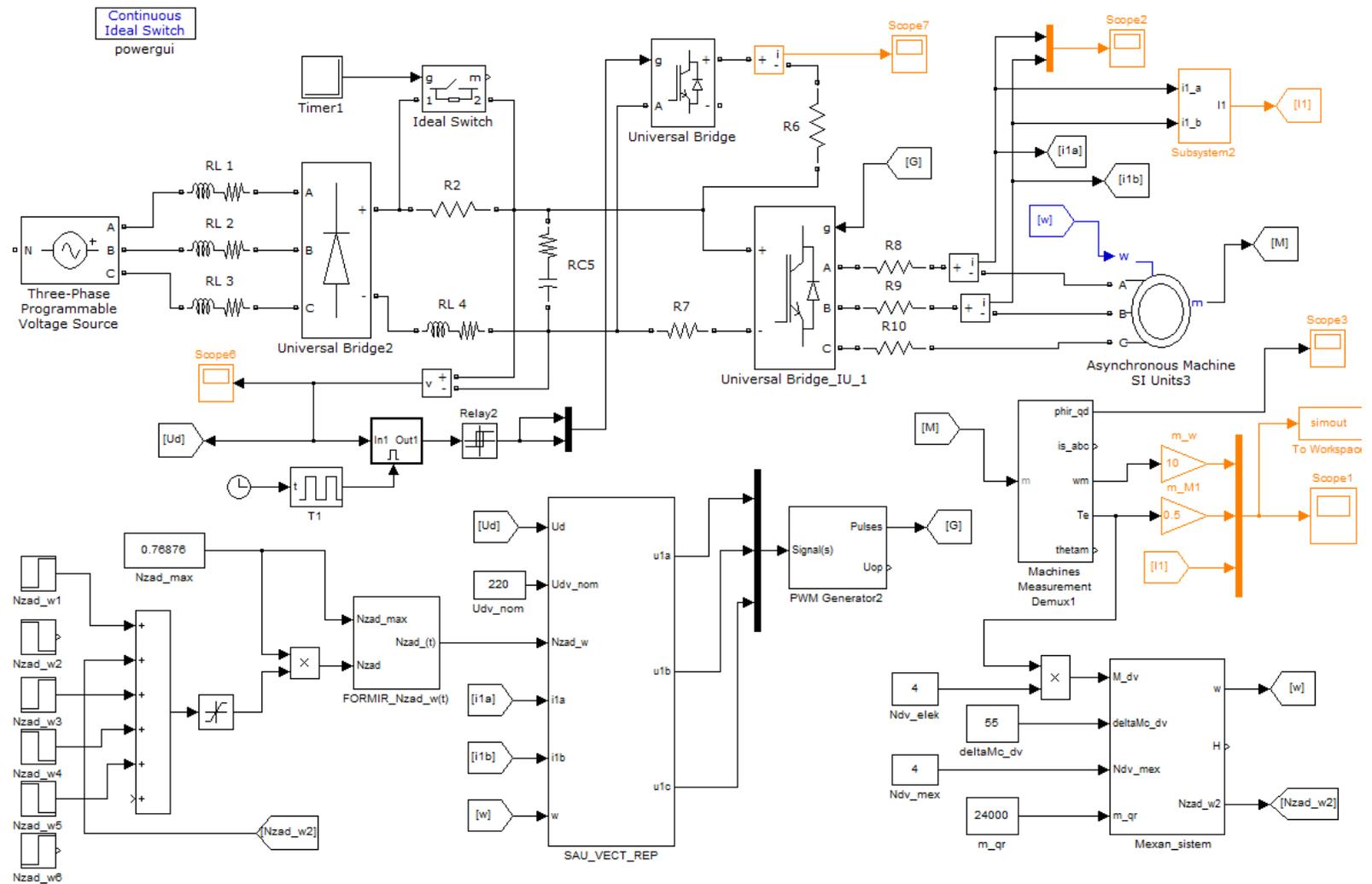


Рисунок 29 – Схема набора имитационной модели электропривода с ОМС

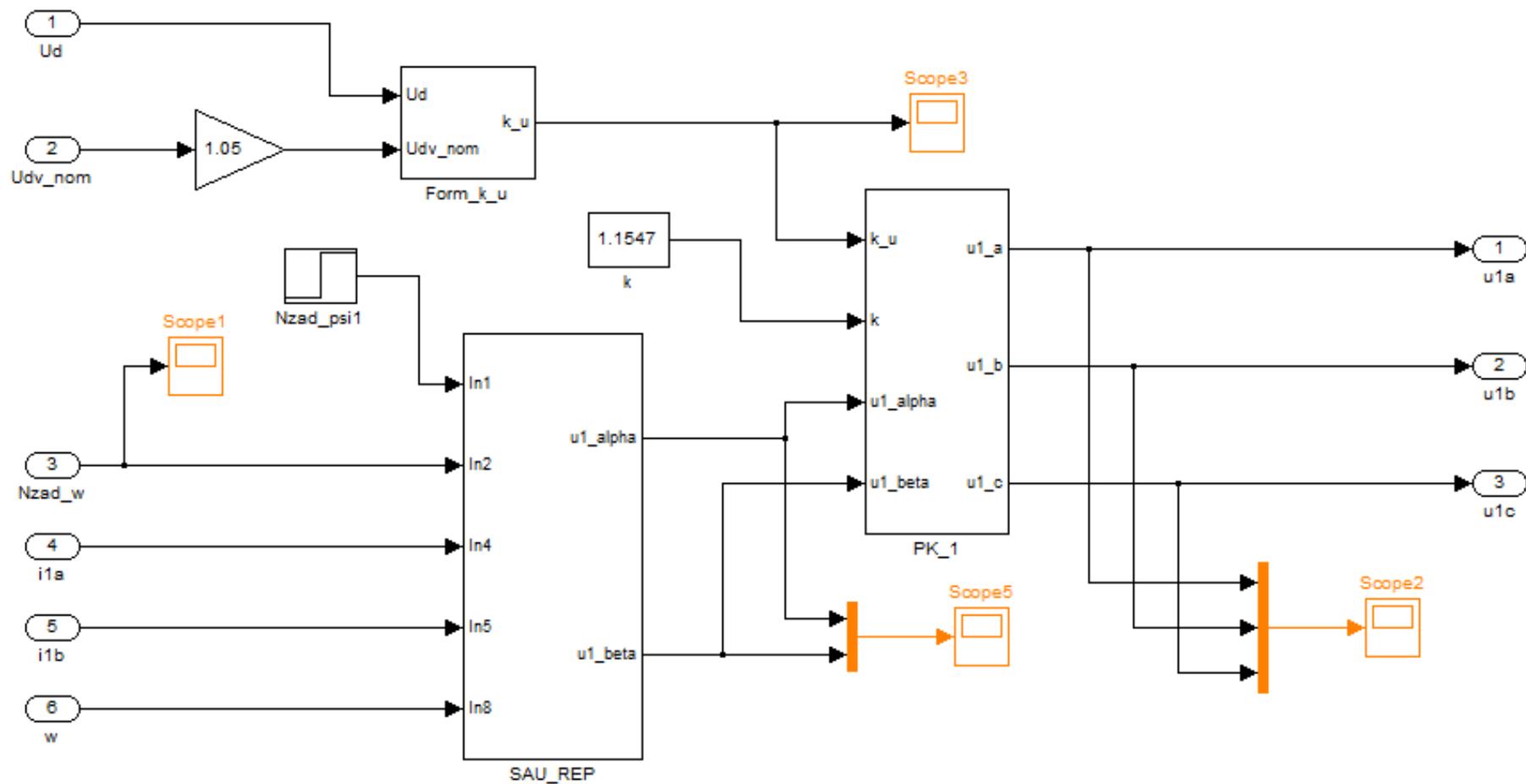


Рисунок 30 – Схема набора модели системы векторного управления

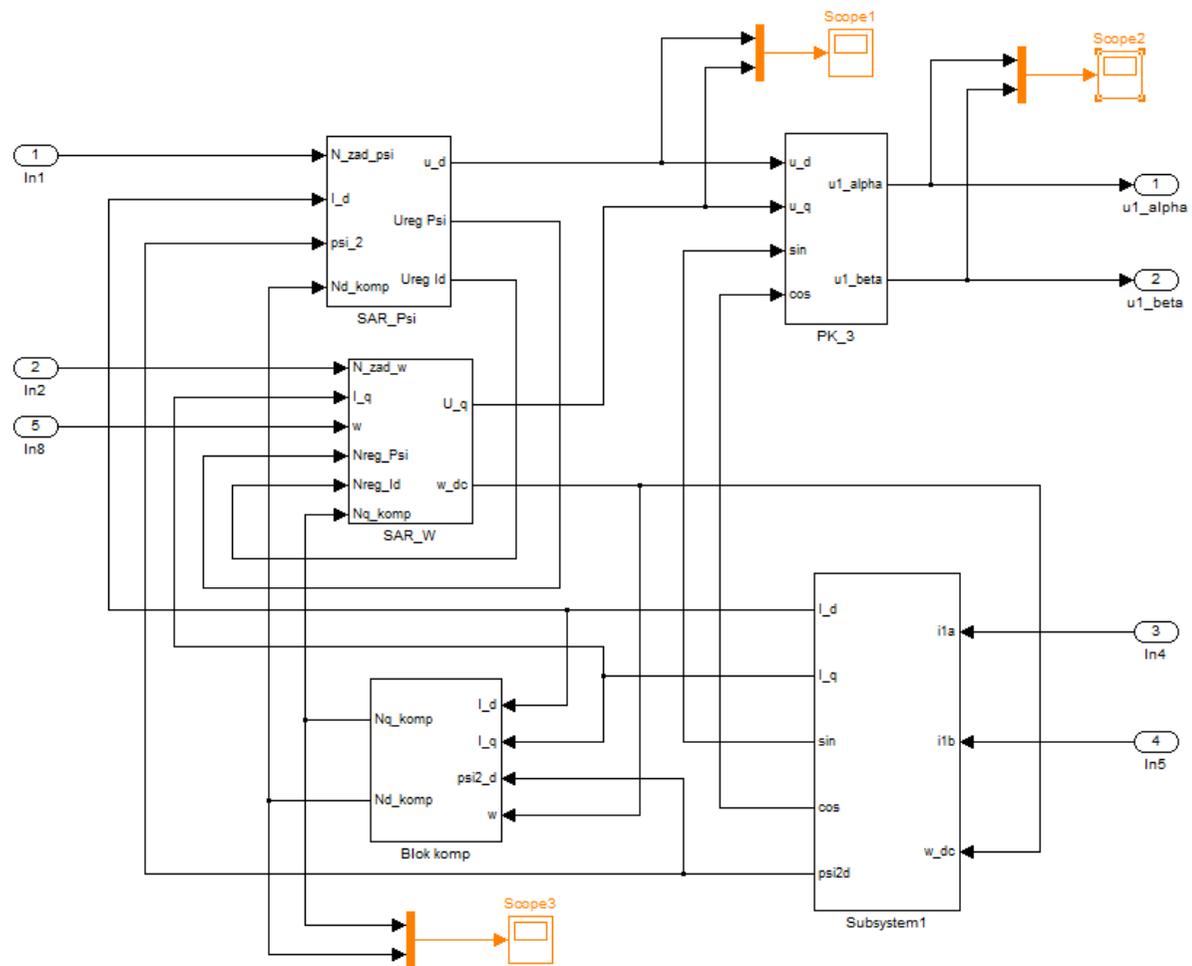


Рисунок 31 – Схема набора модели системы управления электропривода

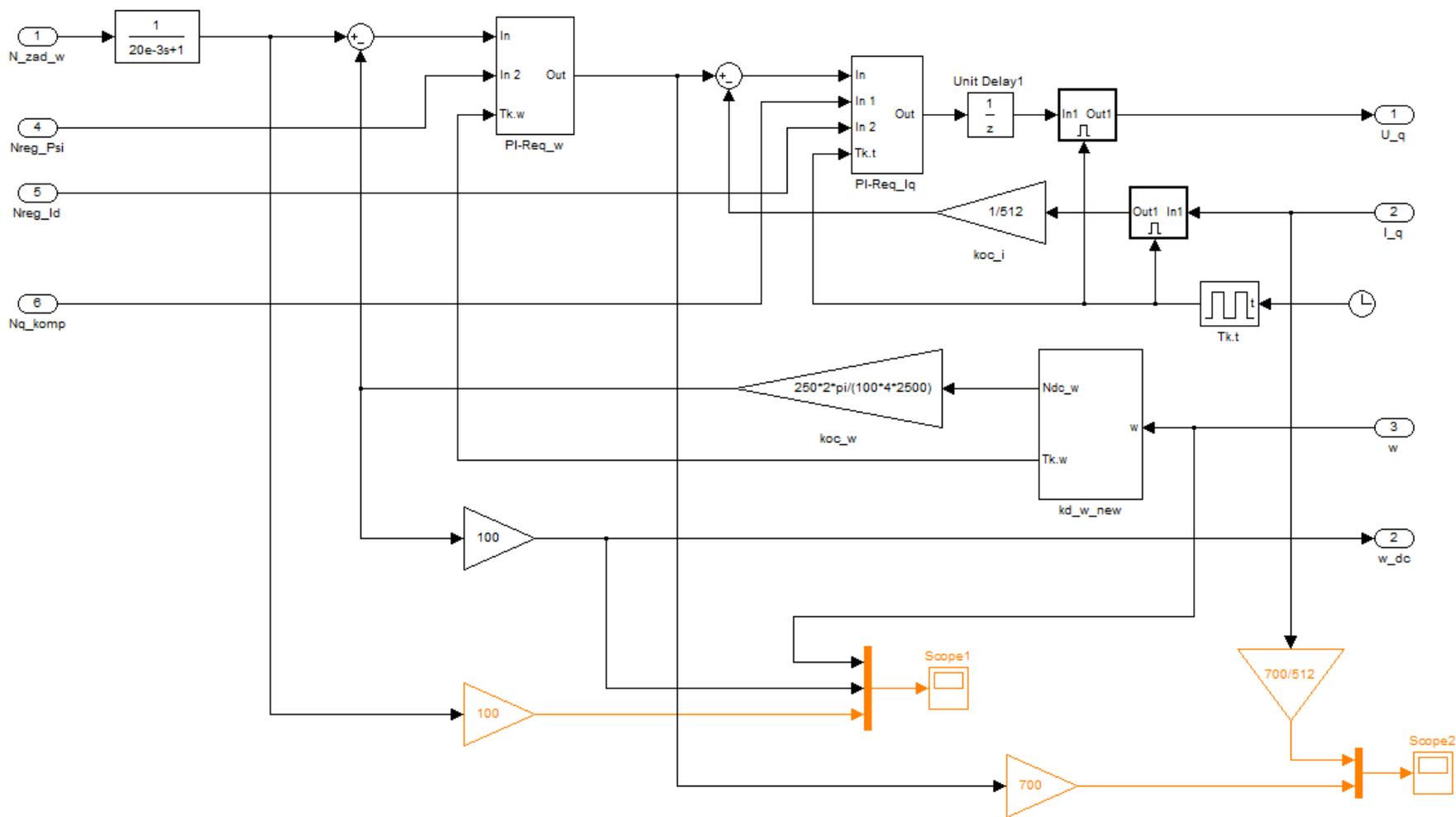


Рисунок 33 – Схемы набора систем регулирования скорости

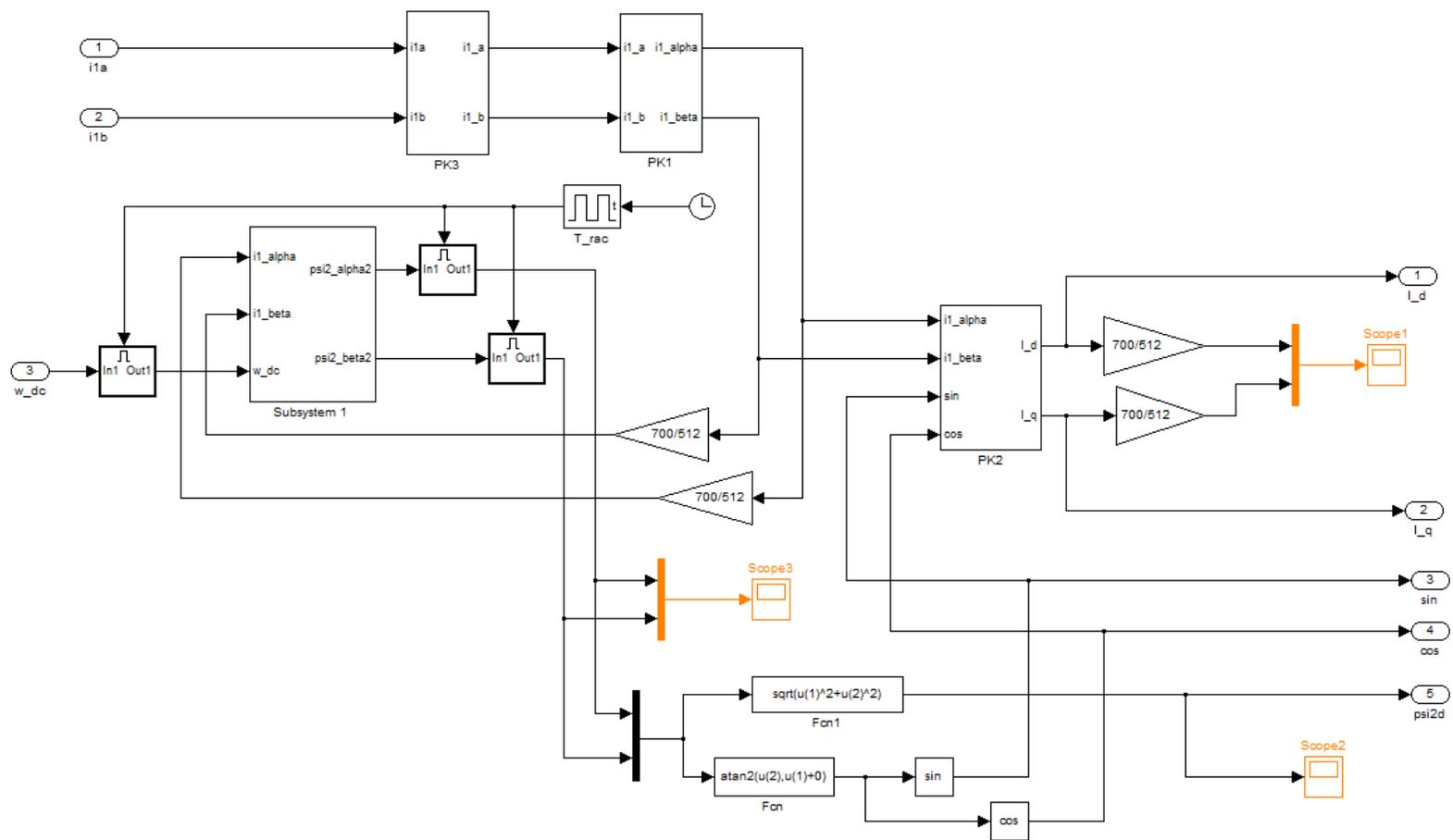


Рисунок 34 – Схемы набора блока измерения и расчета координат

3.10.2 Одномассовая механическая система электропривода

Одномассовая механическая система электропривода характеризуется переменными значениями движущего момента $M_{\text{дв экв}}$, зависящего от числа работающих электродвигателей $n_{\text{дв эл}}$, статических моментов активного характера $M_{\text{сА}}$, развиваемого грузом, и реактивного характера $M_{\text{сР}}$, вызванного силами трения двигателей, редукторов и механизма лебедки, эквивалентного момента инерции $J_{\text{э омс}}$, который зависит от массы поднимаемого груза $m_{\text{гр}}$ и числа подсоединенных двигателей $n_{\text{дв мех}}$:

$$M_{\text{дв экв}} = M_{\text{дв эм}} \cdot n_{\text{дв эл}}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{сА}} = M_{\text{гр прив}} = 0.0638 \cdot (m_{\text{в}} + m_{\text{гр}} + m_{\text{вт}} + m_{\text{нт}} + m_{\text{к}}), \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{сР}} = \Delta M_{\text{с дв экв}} + \Delta M_{\text{с ред прив}} + \Delta M_{\text{с мех прив}}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где

$$\Delta M_{\text{с дв экв}} = \Delta M_{\text{с дв}} \cdot n_{\text{дв мех}}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta M_{\text{с ред прив}} = 226.93 + 0.05555 \cdot M_{\text{гр прив}}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta M_{\text{с мех прив}} = 308.13 + 0.0817 \cdot M_{\text{гр прив}}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$J_{\text{э омс}} = J_{1\text{э}} + J_{2\text{э прив}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где

$$J_{1\text{э}} = (1.2 \div 1.25) \cdot J_{\text{дв э}} = 1.22 \cdot 4 \cdot n_{\text{дв мех}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{2\text{э прив}} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot (m_{\text{тв}} + m_{\text{тн}} + m_{\text{в}} + m_{\text{гр}} + m_{\text{к}}), \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Схема набора модели одномассовой механической системы электропривода приведена на рисунке 35.

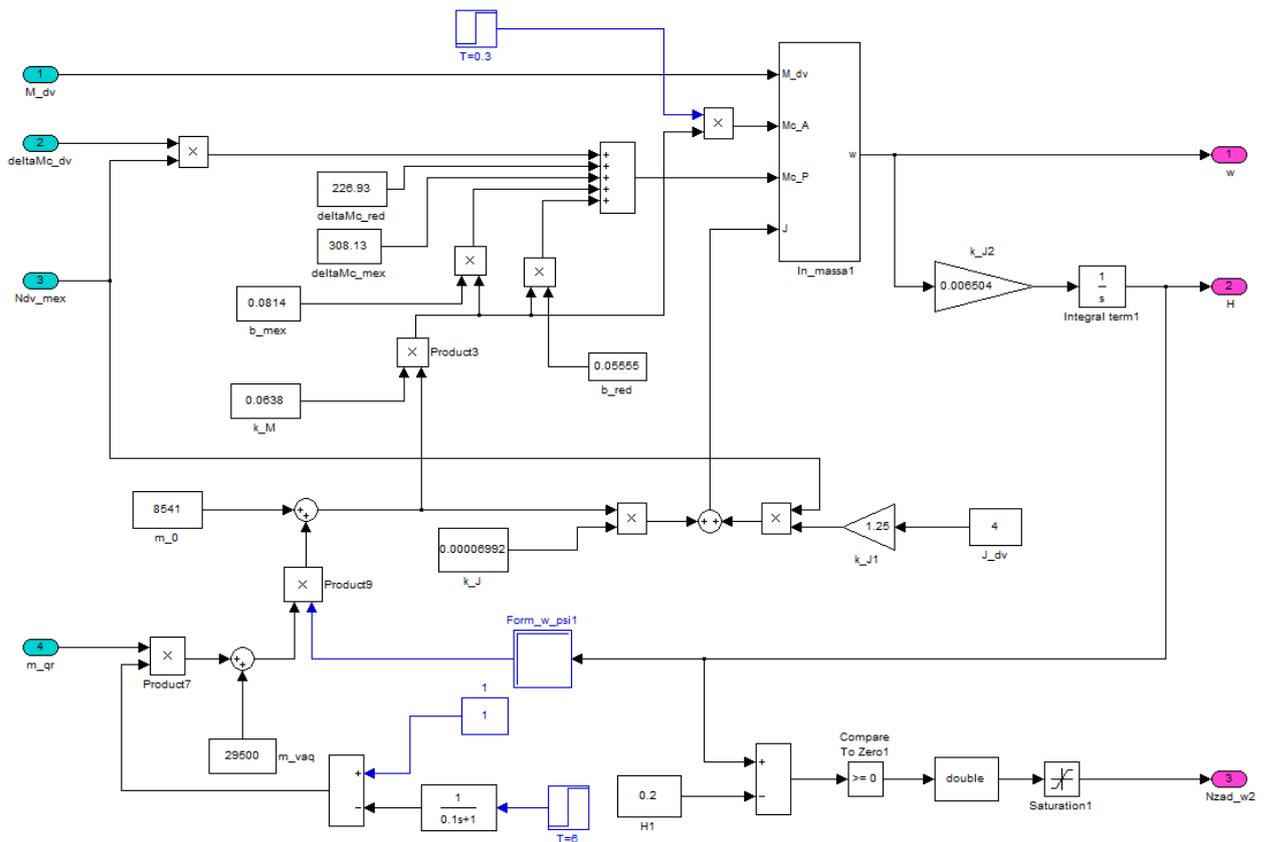


Рисунок 35 – Схема модели одномассовой механической системы

3.10.3 Исследования имитационной модели электропривода с ОМС

Исследования разработанной имитационной модели разработанного электропривода проводились методом компьютерного моделирования. Целью исследований являлась проверка работоспособность системы асинхронного электропривода в основных технологических режимах работы подъемной лебедки установки тушения кокса.

В соответствии с технологическим процессом (раздел 1, рисунки 3 и 4) типовыми режимами работы лебедки являются:

- подъем груженого кузова с платформы вагона с режимами пуска, торможения и регулирования скорости двигателя;
- спуск груженого кузова перед разгрузкой;
- подъем порожнего кузова после разгрузки;
- спуск порожнего кузова с платформы вагона с режимами пуска, торможения и регулирования скорости двигателя.

Дополнительно исследовались режимы торможения двигателя с максимальной скорости с целью выбора сопротивления тормозного резистора.

1. Выбор сопротивления тормозного резистора

Сопротивление тормозного резистора выбиралось в режиме «пуск – стоп» двигателя на максимальную скорость $\omega_{\text{ЭП.макс}} = 76.876 \text{ рад/с}$ при минимальном статическом моменте нагрузки $\Delta M_{\text{с дв}} = 55 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и максимальном напряжении сети $U_{\text{с макс}} = 418 \text{ В}$.

Выбранное значение сопротивления тормозного резистора $R_{\text{T}} = 2 \text{ Ом}$.

Диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{дв.эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, напряжения на конденсаторе $U_d(t)$ и тока тормозного резистора $I_{\text{T}}(t)$ при $R_{\text{T}} = 2 \text{ Ом}$ в режиме «пуск – стоп» двигателя на максимальную скорость приведены на рисунке 36.

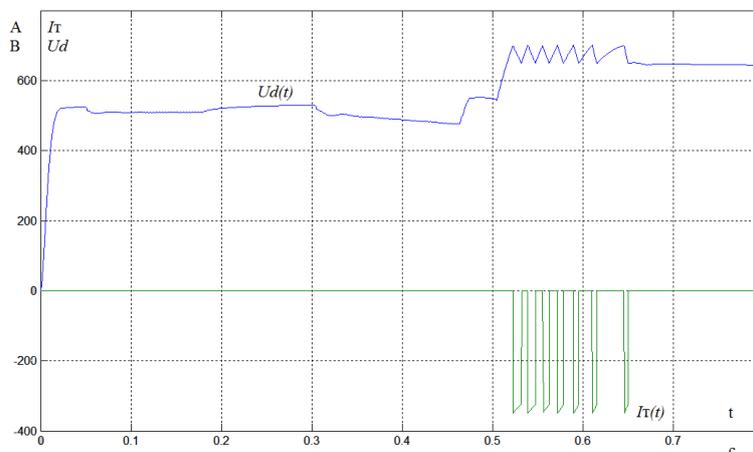
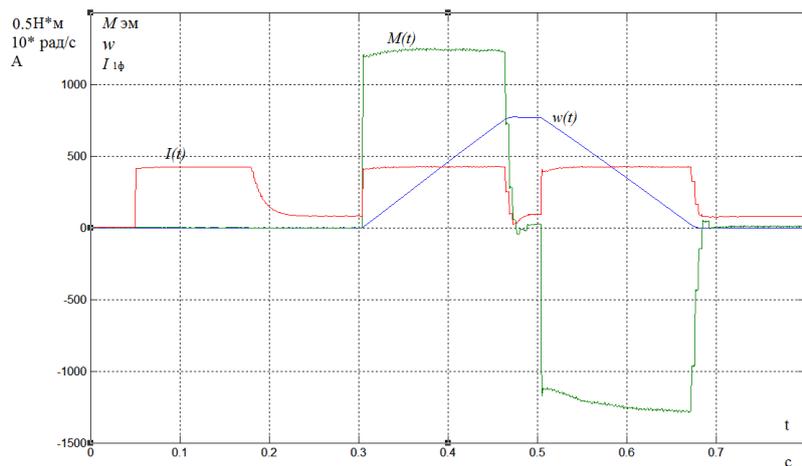


Рисунок 36 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{\text{дв.эм}}(t)$, $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя и $U_d(t)$, $I_T(t)$ преобразователя в режиме «пуск – стоп» двигателя на максимальную скорость

2. Проверка электропривода в режиме подъема груженого кузова с платформы вагона

Исследования проведены при максимальном грузе кокса $m_{\text{гр}} = 24000 \text{ кг}$ и трех значениях задания скорости подъема: $V = 0.1 \text{ м/с}$, $V = 0.25 \text{ м/с}$ и $V = 0.5 \text{ м/с}$. На начальном участке подъема имитировался режим закрытия захватов вагона и натяжения канатов. Переключение

двигателя на скорость $V = 0.25$ м/с происходило автоматически при подъёме на высоту $H = 0.2$ м.

Диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{дв.эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме подъема груженого кузова с платформы вагона приведены на рисунке 37.

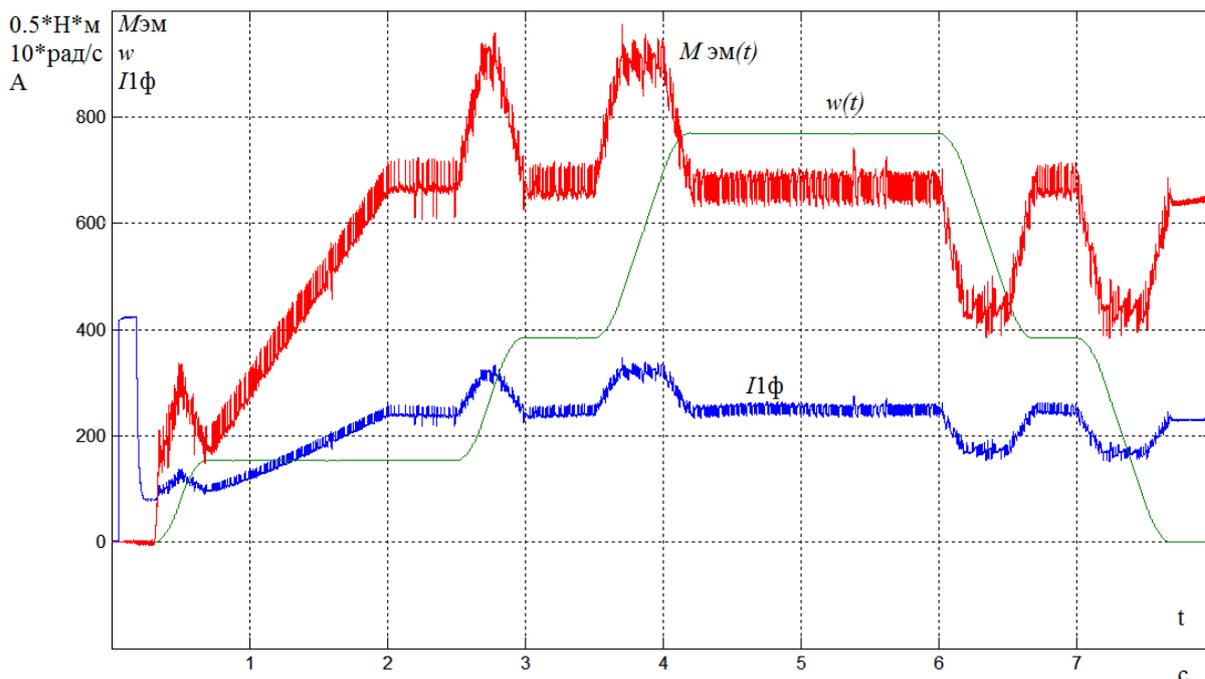


Рисунок 37 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$ и $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме подъёма груженого кузова с платформы вагона

3. Проверка электропривода в режимах спуска груженого кузова и подъема порожнего кузова в разгрузочном устройстве

Спуск вагона осуществлялся при максимальном грузе кокса $m_{гр} = 24000$ кг, а подъем – при минимальном $m_{гр} = 0$ и наименьшем значении скорости подъёма и спуска $V = 0.1$ м/с.

Диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{дв.эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режимах работы электропривода лебедки

при разгрузке кузова в разгрузочном устройстве приведены на рисунке 38.

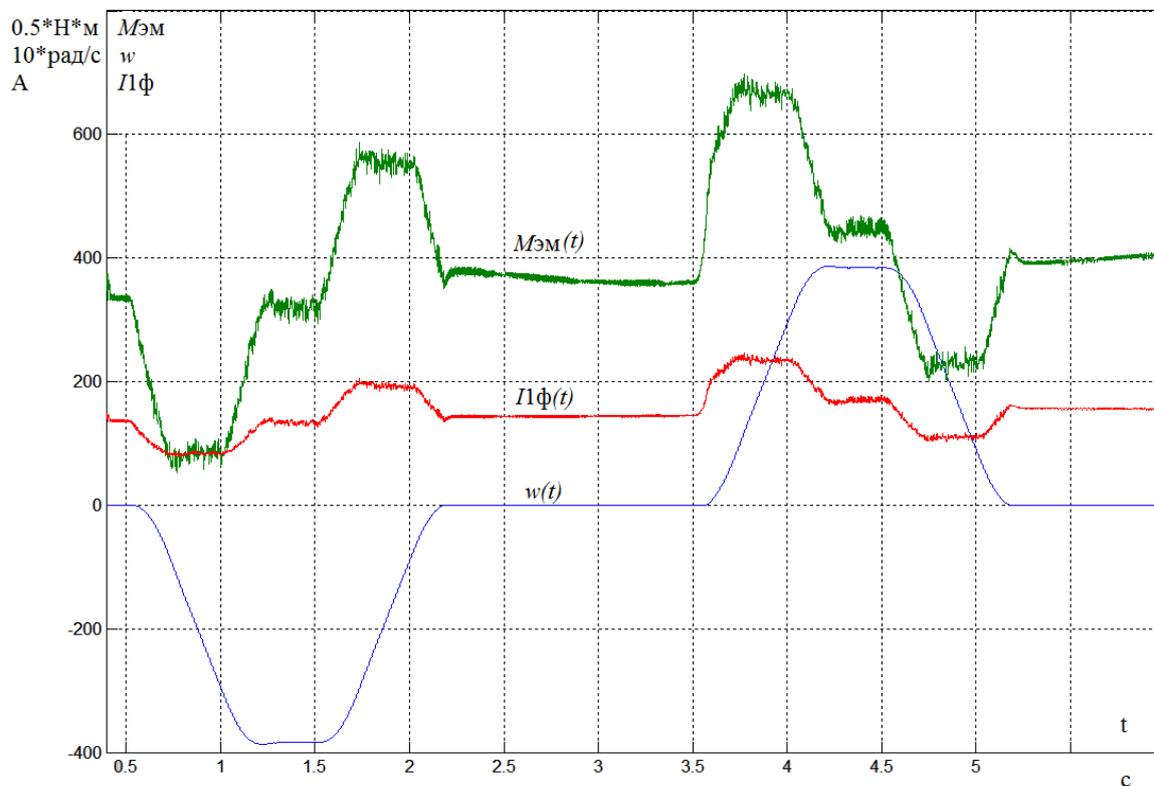


Рисунок 38 – Диаграммы $I_{1ф}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$ и $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режимах работы лебедки при разгрузке кузова в разгрузочном устройстве

4. Проверка электропривода в режиме спуска порожнего кузова на платформу вагона

Исследования проведены при порожнем вагоне $m_{гр} = 0$ и трех значениях задания скорости спуска: $V = 0.1$ м/с, $V = 0.25$ м/с и $V = 0.5$ м/с. На конечном участке спуска при высоте $H < 0.2$ м имитировался режим ослабления канатов и раскрытия захватов вагона.

Диаграммы тока $I_{1ф}(t)$, электромагнитного момента $M_{дв.эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме спуска порожнего кузова на платформу вагона приведены на рисунке 39.

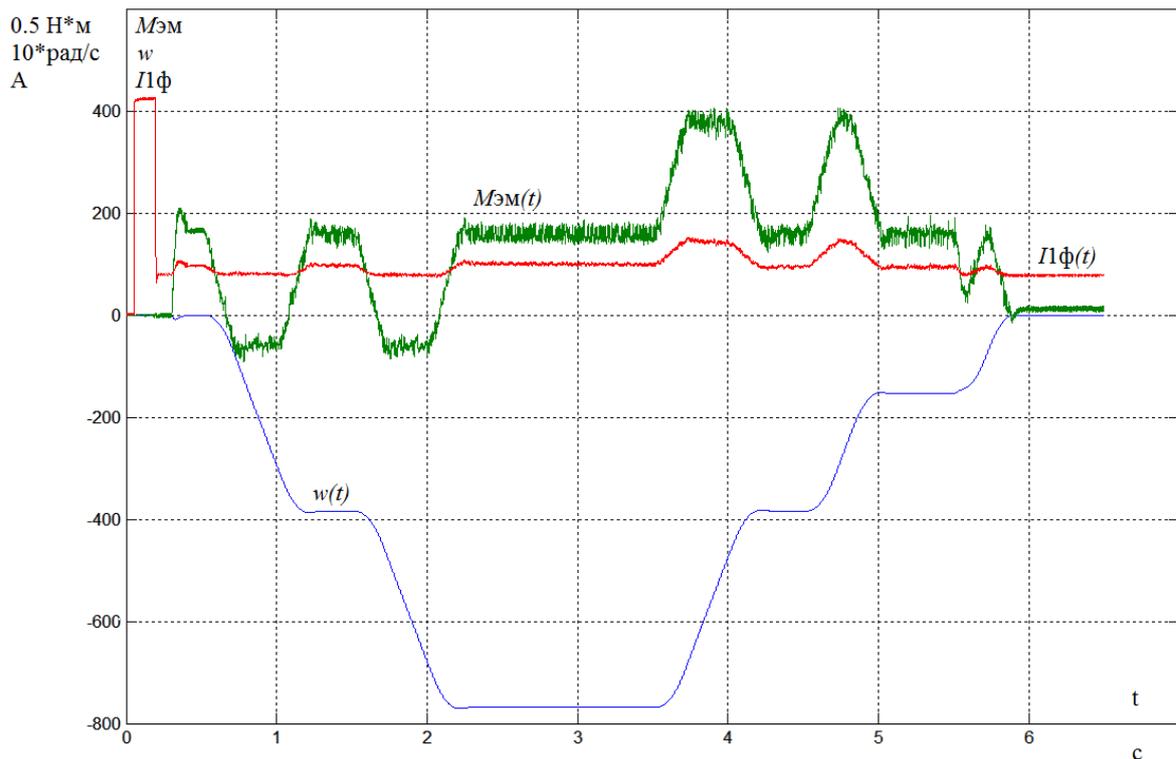


Рисунок 39 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$ и $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме спуска порожнего кузова на платформу вагона

5. Проверка электропривода в режиме подъема груженого кузова с платформы вагона при работе тремя двигателями

Исследования проведены при тех же условиях, что и в пункте 2.

Диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{дв.эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме подъема груженого кузова с платформы вагона и работе тремя двигателями приведены на рисунке 40.

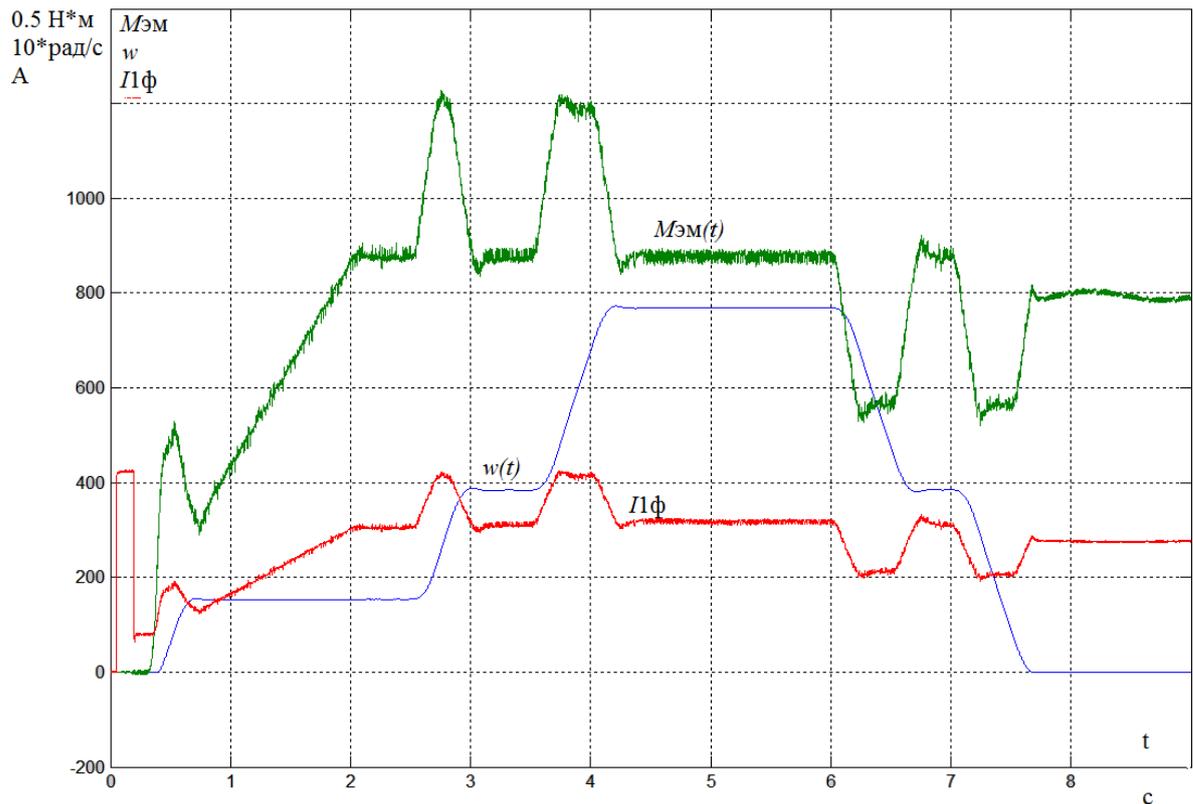


Рисунок 40 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$ и $\omega_{дв}(t)$ двигателя в режиме подъёма груженого кузова с платформы вагона при работе тремя двигателями

3.10.4 Двухмассовая механическая система электропривода

Для проведения исследований электропривода с двухмассовой механической системой были внесены изменения в схему набора имитационной модели электропривода (рисунок 35) и разработана модель ДМС.

Параметры двухмассовой механической системы:

$$J_1 = J_{1э}; J_2 = J_{2э \text{ прив}}; M_{с1А} = 0; M_{с2А} = M_{сА};$$

$$M_{с2Р1} = \Delta M_{сдв экв} + \Delta M_{средприв} + 0.5 \cdot \Delta M_{смехприв};$$

$$M_{с2Р} = 0.5 \cdot \Delta M_{смехприв}.$$

Схемы набора модели электропривода и двухмассовой механической системы приведены на рисунке 41 и 42.

Для оценки влияния двухмассовой механической системы на работу электропривода были проведены исследования по п. 2. На рисунке 43 и 44 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{дв.эм}(t)$, скорости двигателя $\omega_{дв}(t)$ и второй массы $\omega_2(t)$ в режиме подъема грузеного кузова с платформы вагона.

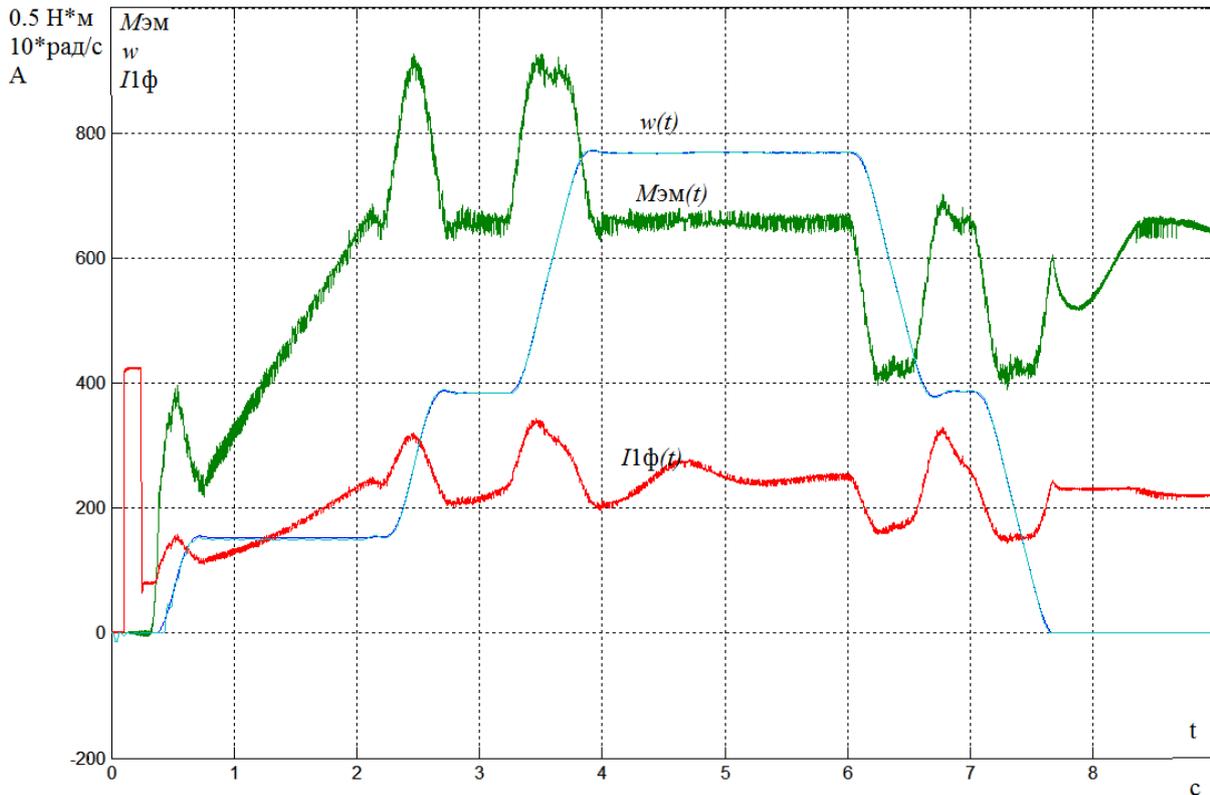


Рисунок 43 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$, $\omega_{дв}(t)$ двигателя и скорости второй массы $\omega_2(t)$ в режиме подъёма грузеного кузова с платформы вагона и учета упругости канатного подвеса

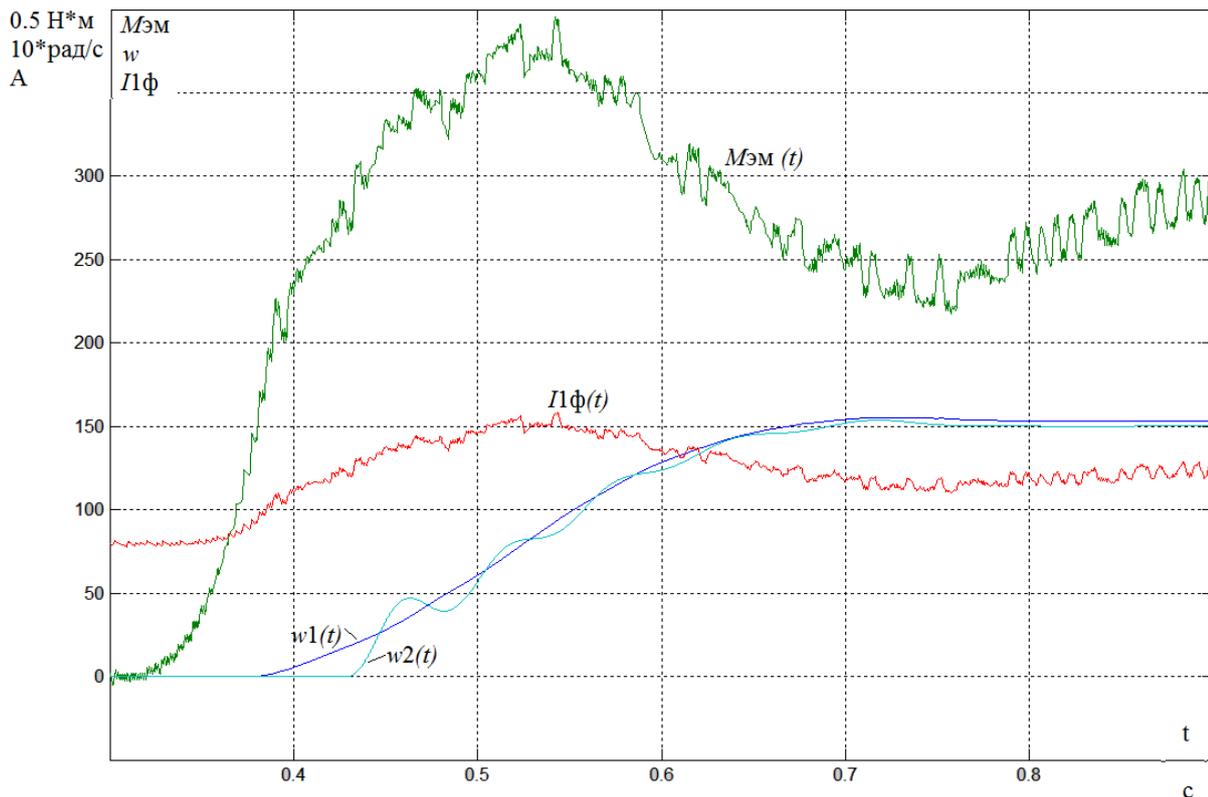


Рисунок 44 – Диаграммы $I_{1\phi}(t)$, $M_{дв.эм}(t)$, $\omega_{дв}(t)$ двигателя и скорости второй массы $\omega_2(t)$ в режиме натяжения канатов при подъёме груженого кузова с платформы вагона

В процессе исследований электропривода с целью уменьшить пульсации тока и момента двигателя были изменены настройки регулятора скорости:

$$T_{рс\text{ факт}} = 2 \cdot T_{рс\text{ расч}} = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ с} \quad , \quad k_{рс\text{ факт}} = k_{рс\text{ расч}} / 2 = 18.57 / 2.$$

Экспериментально были подобраны следующие значения коэффициентов коррекции регулятора потокосцепления $k_{\psi\text{ кор}} = 1$ и регулятора скорости

$$k_{\omega\text{ кор}} = 2.3.$$

Выводы по результатам компьютерных исследований:

– электропривод формирует плавные переходные процессы с заданными значениями ускорения и рывка и принципиально может обеспечить выполнение требуемой диаграммы движения (рисунок 4) как при ручном, так и автоматическом режимах управления.

– при отказе одного двигателя три других в режиме подъема груженого кузова работают со статическим моментом, превышающим номинальный момент двигателя, однако к перегреву двигателя это привести не может, поскольку технологический режим работы двигателей близок к номинальному кратковременному режиму работы электродвигателей;

– динамические нагрузки двигателей не превышают выбранное значение максимального момента, в том числе и при отказе одного из двигателей;

– канатный подвес является причиной колебательного характера натяжения канатов в начале подъема, при натянутых канатах упругость практически не сказывается по причине плавного характера переходных процессов в электроприводе.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Коммерческая ценность разработки, является основополагающей, по сравнению с масштабом открытия, об этом говорит нам современная перспектива научного проекта. Оценка которого осложнена на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного изделия. Одно из главных и необходимых условий при поиске источников финансирования – это эстиматизацию коммерческой ценности проектируемого субъекта. Это является первостепенным для разработчиков, которые должны представлять перспективы и состояние проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что привлекательность коммерческой составляющей научного проекта определяется тем, как быстро разработчик сможет найти ответы на такие вопросы: будет ли изделие востребовано рынком; какой бюджет у научного проекта; какой срок реализации; какая цена и т.д..

Следовательно, цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» – обеспечение конкурентоспособности, создание ресурсоэффективных и ресурсосберегающих технологий.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- Инициализация проекта;
- Оценка коммерческого потенциала проекта с помощью технологии QuaD;
- Планирование научно-исследовательских работ;
- Составление сметы затрат на проектирование;
- Оценки ресурсной эффективности продукции.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители проекта

Модернизация производственных мощностей является очень важная задача в любой промышленности. Технологический процесс производства кокса ни чем не выбивается из общего ряда вещей. Данная модернизация требует особого внимания при проектировке.

Проектируемая система обладает рядом преимуществ по сравнению с изначальной версией, не получившей никакой модернизации на протяжении последний сорока лет. А именно:

- Меньшие габариты;
- Меньший вес, вследствие использования Стали 3 в качестве материалов корпуса;
- Высокий коэффициент мощности;
- Высокий КПД;
- Повышенная прочность.
- Инновационная система master-slave.

В дальнейшем результат проекта может быть использован в качестве типовых решений по модернизации и разработке лебедок на рудниковых, металлургических и коксовывающих предприятиях, таким образом можно говорить, что проект имеет коммерческий потенциал. Потенциальными потребителями результатов этого проекта являются предприятия металлургических и коксовывающих промышленностей, расположенные на территории РФ.

4.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение

целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) *Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:*

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) *Показатели оценки качества разработки:*

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (табл. 4.3).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 4.1 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,12	87	100	0,87	10,44
3. Помехоустойчивость	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Энергоэкономичность	0,11	90	100	0,9	9,9
5. Надежность	0,06	97	100	0,97	5,82
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	95	100	0,95	6,65
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9

7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				91,41

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,12 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 91,41,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 91,41, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

4.2. Планирование работ по НТП

4.2.1. Структура работ в рамках проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного проекта;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного проекта, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в табл.4.2.

Таблица 4.2. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

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

4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

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

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.1)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i}, \quad (4.2)$$

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

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

\mathcal{C}_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3. Разработка графика проведения проектирования

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

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.4)$$

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

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

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

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

Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 6.3).

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

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

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

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

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

Таблица 4.3. Временные показатели проведения научного проекта

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		$t_{ожс}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП		4		9		6		6		10
Расчет параметров двигателя и модели		4		6		5		5		8
Выбор способа регулирования скорости		2		4		8		8		12
Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»		2		4		3		3		5
Разработка математической модели системы АУ ЭП	3		6		5		5		8	

Оптимизация электропривода САР		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки		1		3		2		2		4

На основе табл. 4.3 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.4. Календарный план-график (Диаграмма Ганта)

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11														
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7														
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10														
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8														

Таблица 4.5 План разработки выполнения этапов проекта

№ п/п	Перечень выполняемых работ	Исполнители		Разряд	Продолж. (дней)
		Кол-во	Должность		
1	Получение тех. задания на разработку проекта	3	научный руководитель инженер инженер	15 9 10	1
2	Сбор исходных данных	1	инженер	10	4
3	Ознакомление с технической документацией	1	инженер	10	4
4	Электромагнитный расчет двигателя	1	инженер	10	5
5	Расчет и выбор блока добавочных сопротивлений двигателя	1	инженер	10	2
6	Расчет технологической части проекта	1	инженер	10	2
7	Проверка выполненных расчётов	2	научный руководитель инженер	15 10	1
8	Выполнение чертежей, схем	2	инженер инженер	9 10	3
9	Технико-экономическое обоснование выбора оборудования	1	инженер	10	4
10	Разработка раздела БЖД	1	инженер	10	4
11	Оформление пояснительной записки	1	инженер	10	2
12	Проверка пояснительной записки и чертежей	1	научный руководитель, инженер	15 10	1
Длительность работы, дней: инженер Юр					33
Длительность работы, дней: инженер 9р					4
Длительность работы, дней: научный руководитель 15р					3

4.3.1 Смета затрат на подготовку проекта

Суммарные издержки на проектирование определяем по выражению:

$$\Sigma I_{\text{проекта}} = I_{\text{з.пл}} + I_{\text{соц}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}}, \quad (4.5)$$

где $I_{\text{з.пл}}$ - издержки на заработную плату;

$I_{\text{соц}}$ – издержки на социальные отчисления;

$I_{\text{мат}}$ – материальные издержки;

$I_{\text{ам}}$ – амортизационные издержки;

$I_{\text{пр}}$ – прочие издержки;

$I_{\text{накл}}$ – накладные расходы.

Издержки на заработную плату

Таблица 4.6 Единая тарифная сетка с учетом занимаемой должности

Должность	Оклад	Доплата	Коэффициент за отпуск	Районный коэффициент	Итоговая зарплата за месяц	Средняя зарплата за 1 день один день, руб.	Количество дней работы над проектом	ФЗП
Научный руководитель, 15р	23300	220 0	1,1	1,3	36465	1736	3	5168
Инженер 10р	14500		1,1	1,3	20735	987	33	32586
Инженер, 9р	14500		1,1	1,3	20735	987	4	3948
Итого					68282		40	41702

$$I_{\text{з.пл}} = \frac{(3 \cdot k_1 + D) \cdot k_2}{21} \cdot X \quad \text{или} \quad I_{\text{з.пл}} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X, \quad (4.6)$$

где 3 – оклад;

D – доплата за интенсивность труда;

k_1 – коэффициент за отпуск (1,1);

k_2 – районный коэффициент (1,3);

21 – количество рабочих дней в месяце;

X - количество рабочих дней затраченных на проект (3 дня).

Зарплата.

Расчет для научного руководителя 15 разряда:

$$I_{з.пл} = \frac{(3 \cdot k_1 + Д) \cdot k_2}{21} \cdot X = \frac{(23300 \cdot 1,1 + 2200) \cdot 1,3}{21} \cdot 3 = 5168 \text{ (руб.)}$$

Расчет для инженера 9 разряда:

$$I_{з.пл} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{(14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3)}{21} \cdot 4 = 3948 \text{ (руб.)}$$

Расчет для инженера 10 разряда:

$$I_{з.пл} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{(14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3)}{21} \cdot 33 = 32587 \text{ (руб.)}$$

Тогда:

$$I_{з.пл\Sigma} = \Sigma I_{з.пл} = 5168 + 3948 + 32587 = 41702 \text{ (руб.)}$$

4.3.2 Отчисления на социальные нужды

В статью расходов «отчисления на социальные нужды» закладывается обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования, от элемента «затраты на оплату труда». Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от ФЗП.

$$I_{соц} = 0,3 \cdot I_{з.пл\Sigma} = 0,3 \cdot 41702 = 12510 \text{ (руб.)} \quad (4.7)$$

4.3.3 Материальные затраты на канцелярские товары

Материальные затраты на канцелярские товары примем в размере 1000 руб. (в условиях цен на канцелярские товары в настоящее время).

$$I_{\text{мат}} = 1000 \text{ (руб.)}$$

4.3.4 Амортизация вычислительной техники

Основной объем работ по разработке проекта был выполнен на персональном компьютере первоначальной стоимостью 34 тысячи рублей. Произведём расчёт амортизации стоимости ПК.

$$I_{ам} = \frac{T_u}{T_{кал}} \cdot \Phi_{кт} \cdot N_{\phi} = \frac{30}{365} \cdot 34000 \cdot \frac{1}{5} = 557,38 \text{ (руб.)}, \quad (4.8)$$

где T_u – количество отработанных дней на ПК;

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

$\Phi_{кт}$ – первоначальная стоимость ПК;

$N_{\phi} = 1/T_{сл}$ – срок полной амортизации. (4.9)

4.3.5 Прочие неучтенные затраты

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 10% от суммы расходов на материальные затраты, услуги сторонних организаций, амортизации оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

$$\begin{aligned} I_{пр} &= 0,1 \cdot (I_{з.пл} + I_{соц} + I_{мат} + I_{ам}) = \\ &= 0,1 \cdot (41702 + 12510 + 1000 + 557) = 5577 \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы составят 200% от ФЗП. Включают в себя затраты на хозяйственное обслуживание помещения, обеспечение нормальных условий труда, оплату за энергоносители и другие косвенные затраты.

$$I_{\text{накл}} = 2 \cdot I_{3.\text{пл}\Sigma} = 2 \cdot 41702 = 83404 (\text{руб.}). \quad (4.11)$$

5 Социальная ответственность

Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему законодательных актов и соответствующих им социально-экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Техника безопасности представляет собой систему организационных технических мероприятий и средств, предотвращающих воздействие опасных производственных факторов, которые приводят к несчастным случаям на производстве. Производственная санитария представляет собой систему организационных, гигиенических и санитарно-технических мероприятий и средств, предотвращающих воздействие вредных производственных факторов, которые приводят к профессиональному заболеванию.

В данном разделе мы рассмотрим вопросы технологического процесса сборки асинхронного тягового двигателя. Для осуществления этого технологического процесса применяется следующее оборудование: транспортная система, ручные инструменты. Технологический процесс сборки включает в себя следующие виды работ: продувку деталей, работу с транспортными приспособлениями.

5.1 Анализ опасных и вредных факторов

На рассматриваемом участке при сборке происходит образование пыли и других вредных факторов, согласно заводской лаборатории.

Таблица 5.1 Концентрация вредных веществ

Вещества	ПДК, мг/м	Класс опасности	Агрегатное состояние
СО	20	4	Газ
Пыль свинцовая	4	2	Аэрозоль
Пыль	6	4	аэрозоль

Периодический контроль содержания в воздухе рабочей зоны вредных веществ осуществляется силами заводской лаборатории или санитарно-гигиенической станции.

При сборке электрических двигателей возникает ряд вредных и опасных производственных факторов.

Опасные факторы возникающие при данном технологическом процессе:

- Поражение электрическим током, при работе испытательной станции.
- Получение механических травм, при слесарно-сборочных работах. (возможность падения с высоты различных деталей и предметов, оборудование работающее под давлением выше атмосферного, пневмоинструмент, глазной травматизм, стружка).
- Пожар (наличие открытого огня при проведении сварочных и других работ, короткое замыкание и другие причины)

Наряду с опасными факторами можно выделить вредные факторы, которые приводят к нарушению нормального режима работы. К вредным факторам относятся:

- Отклонение параметров микроклимата на участке общей сборки асинхронного двигателя от установленных норм.
- Шум, при работе с ручным механизированным инструментом.
- Вибрация, при работе с ручным механизированным инструментом.
- Недостаточная освещенность рабочей зоны

Контролем содержания вредных примесей в воздухе и на рабочих местах занимается санитарная лаборатория.

С учётом предельно - допустимых концентраций вредных веществ, эти участки выполняются с вытяжной вентиляцией.

5.2 Производственная санитария

В результате гигиенических исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека.

При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные явления:

- снижается острота зрения, слуха;
- повышается кровяное давление;
- снижается внимание.

Сильно продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно сосудистой и нервной систем. Измерение шума проводят с целью оценки его на рабочих местах или рабочих зонах для сопоставления с требованиями санитарных норм, а также для оценки шумовых характеристик машин и оборудования, с целью разработки мероприятий по борьбе с шумом[9]. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

В цехе на сборочном участке используются вещества, которые оказывают вредное влияние на организм человека. Санитарными нормами установлены предельно - допустимые концентрации вредных примесей в воздухе. Одно из веществ - хромовый ангидрид, его ПДК = 0.01 мг/м³, класс опасности - 1; марганец, его ПДК = 0.1 мг/м³, класс опасности 2. Также при сборке применяется сварка что влечет за собой образование таких веществ как СО, его ПДК = 20 мг/м³, класс опасности 4; Пыль сварочная аэрозоль, её ПДК = 4 мг/м³, класс опасности 2. Также образуется пыль, её ПДК = 6.0 мг/м³, класс опасности 4. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.

5.3 Расчет искусственного освещения

Верно спроектированное и выполненное освещение на предприятиях машиностроительной индустрии, гарантирует возможность нормальной производственной работы.

Задачи расчета искусственного освещения, считается определение количества осветительных приборов, их типа, мощности источников света.

5.3.1 Выбор осветительных приборов

- люминесцентные лампы - открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ОДО, ШОД, ООД - для нормальных помещений с хорошим отражением стен и потолка; их применение допускается при умеренной влажности и запыленности
- Светильники ПВЛ - являются пылевлагозащищёнными, пригодны для некоторых пожароопасных помещений. Мощность лампы 2x40 Вт и 2x80 Вт

5.3.2 Выбор коэффициента запаса

Полученная из таблиц величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп освещённость снижается

Таблица 5.2 Значение коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2.0	1.7
Помещения со средним выделением пыли	1.8	1.5
Помещения с малым выделением пыли	1.5	1.3

Мы имеем помещения со средним выделением пыли $k=1.8$.

5.3.3 Размещение осветительных приборов

При выборе расположения светильников необходимо руководствоваться двумя критериями:

1. обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослеплённости и необходимой направленности света на рабочие места
2. наиболее экономичное создание нормированной освещенности

Как показали исследования, в зависимости от типа светильников

существует наиболее выгодное расстояние между светильниками: $\lambda = \frac{L}{h}$, где

L - расстояние между светильниками;

h - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью.

Для люминесцентных светильников $\lambda = 1 - 1.3$.

Расстояние от стен помещения до крайних светильников рекомендуется брать $0,3L-0,5L$.

Выбираем светильник ПВЛ, $\lambda = 1.1$ размеры помещения $a=15$ м, $b=10$ м, ширина между рядами светильников $L_{CB} = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 5 = 5,5$ м предварительно которое потом будет уточнено.

Количество светильников в одном ряду:

По длине:

$$n_{CB.дл} = \frac{A - L_{CB}}{L_{CB}} + 1 = \frac{15 - 5,5}{5,5} + 1 = 3 \quad (5.1)$$

По ширине:

$$n_{CB.ш} = \frac{B - L_{CB}}{L_{CB}} + 1 = \frac{10 - 5,5}{5,5} + 1 = 2 \quad (5.2)$$

общее число светильников в помещении:

$$n_{CB} = n_{CB.дл} \cdot n_{CB.ш} = 3 \cdot 2 = 6 \quad (5.3)$$

Расстояние между светильниками примем окончательно 4,5м в длину и 6м в ширину см. на рис 5.1

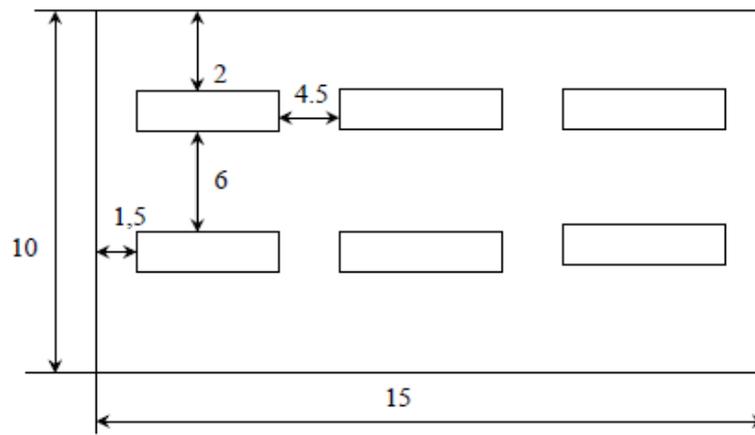


Рис.5.1. План расположения светильников

5.3.4 Расчет осветительной установки

Принципиальной задачей на производстве, считается создание лучших условий для видения. Данную задачу можно решить лишь осветительной системой. В данных нормах рекомендуется освещённость участков, содержащих необходимое оборудование, должна быть более 200 лм.

Расчет делается способом коэффициента применения. Применяя данный способ можно найти световой поток лампы, нужный для создания заданной освещенности горизонтальной плоскости с учетом света, отражённого стёклами и потолками. Способ коэффициента использования применяется только при расчете общего равномерного освещения.

Величина светового потока лампы:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot \eta}, \text{ где} \quad (5.4)$$

E - минимальная освещённость, лк;

k - коэффициент запаса;

S - площадь помещения, м²;

N - число ламп освещения;

η - коэффициент использования светового потока;

Z - коэффициент неравномерности освещения.

Коэффициент использования светового потока:

η - отношение полного светового потока, достигающего освещаемой поверхности, к полному световому потоку в помещении.

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)} = \frac{150}{4 \cdot (15+10)} = 1,5 \quad (5.5)$$

коэффициенты отражения:

$f_n = 50\%$ - состояние потолка (чистый бетонный),

$\rho_0 = 30\%$ - состояние стен (бетонный с окнами).

Коэффициент неравномерности Z введен в формулу светового потока, потому что освещенность, подсчитанная без этого коэффициента, является не минимальной, как требуют нормы, а средней. Введением коэффициента Z это несоответствие устраняется. Для люминесцентных ламп $Z = 0.9$ $E = 200$ лм - минимальная нормативная освещённость, для разряда зрительных работ средней точности (табл.5.4).

$\eta = 0.5$ - для ламп типа ПВЛ:

$$F = \frac{200 \cdot 1,8 \cdot 150 \cdot 0,9}{2 \cdot 6 \cdot 0,5} = 8100 \text{ лм} \quad (5.6)$$

Принимаем в каждом светильнике типа ПВЛ два источника света мощностью по 80 Вт (со световым потоком 4500 лм), которые соответствует отклонениям (-10%, +20%)

5.4 Микроклимат

Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в производственных помещениях, в частности в рабочих зонах. Рабочей зоной называется пространство, высотой до 2-х метров над уровнем пола или

площадки на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих (более 2-х часов непрерывно).

Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96.

Эти требования устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны помещения, нормируемые следующими параметрами: температура, оптимальная влажность, скорость движения воздушного потока. Работа относится к средней тяжести - Па

Значения перечисленных параметров непосредственно к проектируемому участку приведены в табл. 7.3, согласно СанПиН 2.2.4.548-96

Таблице 5.3 Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Параметр	Сезон года	
	Холодный	Тёплый
Температура воздуха, °С	19-21	20-22
Температура поверхностей, °С	18-22	19-23
Относительная влажность, %	60-40	60-40
Скорость движения воздуха, м/с	0,2	0,2

В данном случае это условие выполняется, так как проектируемый участок разработан на базе действующего, где заводская комиссия в своё время проводила замеры искусственного освещения и заключила что оно соответствует норме.

Шум на производстве - это ещё одна проблема, которая наносит большой экономический и социальный ущерб. Шум не благоприятно воздействует на организм человека, технические и физиологические нарушения, снижает работоспособность и создаёт предпосылки для общих профессиональных заболеваний и производственного травматизма.

Необходимые условия для снижения шума:

Всё оборудование, применяемое на участке сборки, для снижения шума установлено на виброопорах.

На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов на улицу, световые проёмы целесообразно закладывать стеклоблоками. Вредным производственным фактором является вибрация - механические колебания твёрдых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечно-сосудистой и нервной системы, а так же опорно-двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ВШВ-003, снабженным датчиком вибрации.

Нормативным документом рассматривающим уровни шума для различных категорий рабочих мест, служебных помещений является ГОСТ 12.1.003-83.

Нормирование теплового инфракрасного излучения. Нормирование теплового излучения в производственных условиях регламентируется в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 12.1.005-88. "Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования в области рабочей зоны" и Санитарных правил и норм СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений".

Нормирование ИК-излучения осуществляется по интенсивности допустимых интегральных потоков излучения с учетом спектрального состава, размера облучаемой площади, защитных свойств спецодежды для продолжительности действия более 50% смены. Интегральная допустимая интенсивность теплового облучения не должна превышать 258 Вт/м² [(2,1 Дж/(см² · мин.))].

Для оценки сочетанного воздействия параметров микроклимата в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания рекомендуется использовать интегральный показатель тепловой нагрузки среды.

Тепловая нагрузка среды (ТНС) - сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата (температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое облучение), выраженное одночисловым показателем в

градусах Цельсия. Значения ТНС-индекса не должны выходить за пределы величин, рекомендуемых согласно СанПиН 2.2.4.548-96

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.), не должны превышать 140 Вт/м². При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

По Санитарным правилам и нормам СанПиН 2.2.4.548-96 температура наружных поверхностей технологического оборудования и ограждений на рабочем месте не должна превышать 45 °С.

5.5 Техника безопасности

Цех относится к помещениям с повышенной опасностью поражением людей электрическим током, характеризуется наличием следующих условий согласно ПУЭ 1.1.13:

- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные);
- возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землёй металлоконструкциям зданий, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

1. К самостоятельной работе допускаются лица прошедшие медицинское освидетельствование, курсовое обучения по теоретическим знаниям и практическим навыкам в работе в объёме программы, аттестацию квалификационной комиссии и инструктаж по охране труда на рабочем месте.

2. Первичный инструктаж рабочий получает на рабочем месте до начала производственной деятельности. Первичный инструктаж производит мастер цеха. Повторный инструктаж рабочий получает - ежеквартально.

3. После первичного инструктажа в течение первых двух – пяти смен должен выполнять работу под наблюдением мастера, либо наставника, после чего оформляется допуск к самостоятельной работе, который фиксируется датой и подписью инструктирующего и инструктируемого в журнале инструктажа.

4. Рабочий должен работать в спецодежде:

- Костюм ХБ ГОСТ 27575-87 ;
- Перчатки ХБ вязанные ГОСТ 5007-87 ;
- Ботинки кожаные с металлическим носком ГОСТ 28807-90 ;
- Рукавицы комбинированные ГОСТ 124010-75.

5. Защита от электростатического электричества осуществляется:

- уменьшение генерации электрических зарядов;
- устранение уже образовавшихся зарядов (защитное заземление);
- нейтрализаторы статического электричества;
- увлажнение воздуха;
- средства индивидуальной защиты: обувь на кожаной подошве или подошве из электропроводной резины;

Опасным производственным фактором (ОПФ) называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или к другому внезапному резкому ухудшению здоровья.

К опасным производственным факторам следует отнести

- электрический ток определенной силы;
- раскаленные тела;
- возможность падения с высоты самого работающего либо различных де-талей и предметов;
- оборудование, работающее под давлением выше атмосферного, и т.д;

Основные мероприятия по предотвращению травматизма предусмотрены: в системе нормативно-технической документации по безопасности труда [ПОТ Р М-016-2001]; в организации обучения и обеспечения работающих безопасными средствами защиты; в прогнозировании производственного травматизма; рациональном планировании средств и определении экономической эффективности от запланированных мероприятий.

Все мероприятия по предотвращению производственного травматизма можно разделить на организационные и технические.

Организационные мероприятия, способствующие предотвращению травматизма: качественное проведение инструктажа и обучение, привлечение их к работе по специальности, осуществление постоянного руководства и надзора за работой, обеспечение рабочих спецодеждой, личными средствами защиты, выполнение правил эксплуатации оборудования.

К техническим способам обеспечения безопасности протекания технических процессов и работы оборудования относятся механизация и автоматизация технологических процессов, дистанционное наблюдение и управление, надежность и прочность оборудования, особые средства тех. безопасности (ограждение, заземление, герметизация, экранирование и т. п.).

В частности основными мероприятиями для защиты от глазного травматизма считаются установка щитков на станках, ношение корректирующих очков, также приспособление при работах, требующих большой точности, оптимального местного освещения на станках.

Механизация — эффективное средство по предотвращению несчастных случаев, облегчению физического труда.

5.6 Пожарная безопасность

Причинами возникновения пожаров могут быть нарушение технологических процессов и неисправность оборудования, в частности несвоевременный ремонт оборудования, нарушение технологических инструкций, введение в

технологии производства материалов без учета их пожароопасных свойств, образование значительных электростатических зарядов. Пожары возможны в результате нарушения правил технической эксплуатации электроустановок, например перегрузок электрических сетей и коротких замыканий в них, недопустимых сопротивлений в местах соединения и контактов проводников, искрения, применения электрооборудования не соответствующего классу пожарной зоны.

Участок общей сборки асинхронного двигателя согласно НПБ105-03. относится к категории «В», т.е. это участок, где может гореть эл. изоляция, материалы оформления помещения, мебель, документы и т.д.

5.6.1 Каждый работающий на объединении должен знать

- При обнаружении пожара или загорания вызвать пожарную помощь по телефону и принять меры у ликвидации очага пожара или действовать по указанию старшего начальника или начальника ДПД.

- Знать пути эвакуации из помещения.

- Знать пожароопасность своего цеха, участка и при обнаружении нарушений противопожарного характера устранить их или сообщить начальнику цеха.

- Знать и уметь пользоваться первичными средствами пожаротушения.

На данном участке для тушения очагов пожара применяются:

- Огнетушители типа ОП-5, ОП-2, ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8;

- Стационарная пенная установка;

- Пожарные гидранты с пожарными рукавами. Огнетушители ОП-5, ОП-2 - порошковые, предназначены для тушения загорания установок под напряжением до 1000В.

Огнетушитель ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 - углекислотные, применяются для тушения электрооборудования под напряжением до 1000 В. и др. предметов.

Стационарная пенная установка - предназначена для тушения загорания различных веществ, за исключением щелочных и щелочноземельных веществ.

Пожарный гидрант – труба, по которой подается вода с разъемом для подключения пожарного рукава. Водой можно тушить очаги пожара за исключением электроустановок под напряжением, ГСМ и химических очагов.

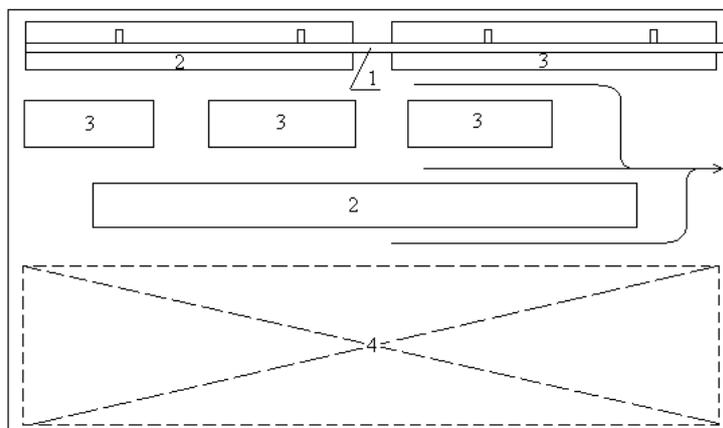


Рис. 5.1 - План эвакуации

1 – монорельс; 2 – верстак для сборки двигателей; 3 – верстак для комплектации роторов; 4 – места складирования деталей и заготовок

5.7 Охрана окружающей среды

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач.

Важными направлениями следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкое применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, обрезки кабелей, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г.

№1110 (с изменениями от 24.12.2014): бытовой мусор после предварительной сортировки складывают в специальные контейнеры для бытового мусора (специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам для сортировки или складирования на городских мусорных полигонах.

Вследствие использования работниками душевых и туалетов образуются жидкие отходы для удаления, которых применяют канализационную систему.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп.

5.8 Чрезвычайная ситуация

Современное высокоразвитое индустриальное общество требует все большего усложнения технологии производства, что неизбежно ведет к росту возможностей возникновения аварий и катастроф. Каждый год на территории России возникают сотни чрезвычайных ситуаций.

Чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Необходимо предупреждение чрезвычайных ситуаций - комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально

возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь в случае их возникновения.

Ликвидация чрезвычайных ситуаций - это аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов.

Под подготовкой объекта к работе в ЧС понимается заблаговременно проводимые организационные, инженерно-технические и специальные мероприятия их работы с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций.

1. Регион размещения, присущие данной местности опасные стихийные бедствия.
2. Метеорологические особенности региона.
3. Социально-экономическая ситуация.

4. Условия размещения объекта, рельеф местности, характер застройки, насыщенность транспортными коммуникациями, наличие потенциально опасных предприятий радиационного, химического, биологического и взрывоопасного характера.

5. Внутренние условия, влияющие на устойчивость:

- численность работающих, уровень их компетентности и дисциплины;
- размеры и характер объекта, выпускаемая продукция;
- характеристика зданий и сооружений;
- особенности производства, применяемых технологий и материальных веществ;
- потребность в основных видах энергоносителей и воде, наличие своих ТЭЦ;
- количество и суммарная мощность трансформаторов, газораспределительных станций (пунктов) и системы канализации.

В разделе был проведён анализ вредных и опасных факторов, рассмотрены разделы пожарной безопасности, производственной санитарии, микроклимат и

охрана окружающей среды. Произведен расчет освещения цеха. Также были рассмотрены разделы техники безопасности, в которых прописаны действия рабочего в различных чрезвычайных ситуациях.

Заключение

Целью данной выпускной квалификационной работы являлся вопрос исследования возможной структуры регулируемого электропривода механизма подъема подъемника установки сухого тушения кокса.

В работе предложено реализовать систему регулируемого электропривода механизма подъема, как систему автоматического управления, выполненную на модульной, программно - перестраиваемой структуре с возможностью реализации законов векторного управления на основе преобразователя частоты ATV 71C13N4 и электродвигателей 1LG4318-8AB-Z фирмы Siemens. Данный преобразователь обеспечивающий требуемый набор функций управления, а электродвигатели предназначены для частотного регулирования. Рассмотрена возможность возврата энергии в сеть.

На основе принятой схемы замещения для выбранного асинхронного двигателя получены и проанализированы механические и электромеханические характеристики. Что позволило установить пределы изменения момента, токов статора, ротора и скорости.

В результате исследования статического режима работы векторного управления установлено, что электропривод обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости, что удовлетворяет техническому заданию.

Проведена настройка на модульный оптимум контура тока, при этом перерегулирования составляет 4,3%, а статическая ошибка равна нулю; контура потокосцепления, при этом перерегулирования составляет 4,3%-6,7%, статическая ошибка равна нулю; контур скорости настроен на симметричный оптимум, при этом перерегулирование составляет 8,1%, статическая ошибка, при постоянном значении задающего сигнала, равна нулю. При ступенчатом задании сигнала управления формирование 95% номинального значения потокосцепления двигателя происходит за 0,15 с.

Для исключения перерегулирования, при подходе к заданному уровню по высоте, контур положения настроен на линейный оптимум. Для ограничения ускорения (замедления) и рывка на входе регулируемого электропривода предусмотрена установка S-образного задатчика скорости.

Были исследованы процессы пуска, изменения нагрузки во время работы, регулирования скорости, трогание на подъём или спуск из положения «удержание груза тормозом», спуск груза и установка груза на опору в регулируемом режиме с управлением оператором, а также установка груза при спуске в заданную позицию по высоте в следящем режиме работы электропривода.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что в случае установки датчика положения на валу первой массы присутствует статическая ошибка позиционирования равная 0,0568 м. Однако установка датчика положения на валу второй массы сопряжена с определенными техническими трудностями – в частности, при использовании гибкого кабеля его необходимо защищать от воздействия высоких температур и теплового излучения, а в зимнее время года от намерзания льда. Также рекомендуется уменьшить ускорения до значения $0,25\text{ м/с}^2$, т.к. в этом случае значительно уменьшается амплитуда колебаний скоростей и моментов при изменении значений заданной скорости подъёма или спуска.

В разделе безопасности и жизнедеятельности произведён анализ опасных и вредных факторов, рассмотрен вопрос техники безопасности, производственной санитарии и вопрос пожарной безопасности.

В технико-экономическом обосновании проведен анализ состава и стоимости ПНР, составлена смета на проведение работ, построен график их выполнения.

В целом, разработанная система автоматического управления регулируемого электропривода механизма подъема подъёмника, обеспечивает выполнение заданных технических требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбович Р.Е., Яковлева Е.И., Филатов А.Б. Технология коксохимического производства. – М.: «Металлургия». 1982. – 360 с.
2. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
3. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 304 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. с.
6. Удут Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд. перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
7. Дементьев Ю.Н. Исследование асинхронного электропривода с частотным векторным управлением методом компьютерного моделирования: Методические указания к выполнению лабораторных и индивидуальных работ исследовательского характера / Ю.Н. Дементьев, Н.В. Кояин, Д.Ю. Ляпунов, Л.С. Удут; Томский политехнический университет, 2015. – 74 с.
8. Чернышев А. Ю.
9. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 210 с.
10. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. /Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
11. Удут Л. С., Кояин Н. В., Мальцева О. П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 6. Механическая система электропривода постоянного тока: учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 148 с.
12. Altivar 71. Каталог 09. Schneider electric.

13. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 272 с.
14. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
15. Дьяконов В. П. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5*: Основы применения: Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
16. Дьяконов В. П. *Simulink 4*. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.
17. Черных И. В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB, SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с.
18. Герман-Галкин С .Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *Matlab 6.0*: учебное пособие. – СПб.: «КОРОНА Принт», 2001. – 320 с.
19. Герман-Галкин С. Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
20. Терехин В.Б. Компьютерное регулирование систем электропривода постоянного и переменного тока в *Simulink*: учебное пособие / В.Б.Терехин, Ю.Н. Дементьев; Томский политехнический университет.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 307 с.
21. СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
22. ГОСТ 12.1.005-88 (2001) ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху санитарной зоны.
23. ПУЭ 2007 Правила устройства электроустановок 7 издание.
24. СНиП II-90-81 Производственные здания промышленных предприятий.
25. НПБ 105-95 Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности
26. СНиП II-2-80 Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций.
27. Князевский Б.А., Марусова Т.П., Чекалин М.А., Шипунов Н.В. Охрана труда в электроустановках. М.:Энергоатомиздат, 1983, - 336 с.,ил.
28. Бринза В.Н., Зиньковский М.М. Охрана труда в черной металлургии. - М.:Металлургия, 1982, - 336 с.
29. ГОСТ 18311-80 Изделия электротехнические - термины и определения основных понятий.

30. ГОСТ 12.2.020-76 ССБТ. Электрооборудование взрывозащищенное.

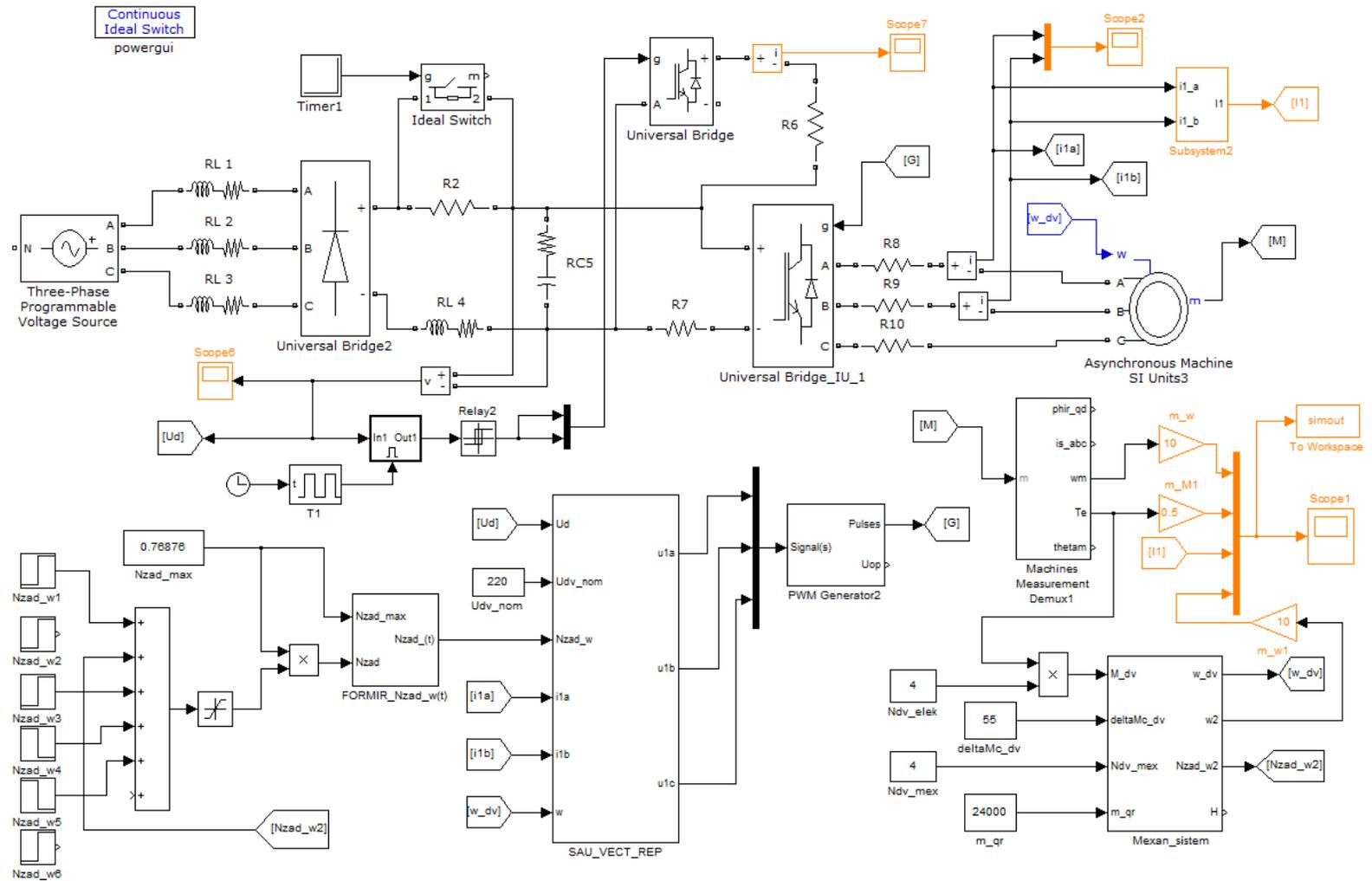
31. Ильин И. М. Управление проектами в России. - Москва: Высшая школа, 1995.-378с.

32. Методическое пособие. Техничко-экономические показатели при проектировании электроприводов /под ред. Королевой Н. И., Трофимовой М. Н. Томск, ТПУ,1986.-34 с.

33. Инструкция по проведению ПНР. ОАО ЗСМК 2001-64 с.

Приложение А

Имитационная модель электропривода



Приложение В

Модель системы управления электроприводом

