

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

Институт - Энергетический
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра - Электропривода и электрооборудования
Профиль подготовки – Электроприводы и системы управления электроприводов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Разработка регулируемого электропривода ПЧ-АД для лифтовых механизмов на основе безредукторной лебедки»

УДК 62-83-52.621.876.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Палванов Роман Бахтиярович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭПЭО	Михальченко Сергей Геннадьевич	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	К.Т.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПЭО	Дементьев Юрий Николаевич	К.Т.Н		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.04.02«Электроэнергетика и электротехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

Институт - Энергетический
 Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра – Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

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

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Палванову Роману Бахтияровичу

Тема работы:

Разработка регулируемого электропривода ПЧ-АД для лифтовых механизмов на основе безредукторной лебедки	
Утверждена приказом директора Энергетического института (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы: (дата)	
---	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(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.).</i></p>	<p>Выполнить проектирование безредукторного электропривода для перемещения кабины пассажирского лифта по системе ПЧ-АД:</p> <p>$G = 400 \text{ кг}$ - Грузоподъемность;</p> <p>$G_k = 800 \text{ кг}$ - масса кабины;</p> <p>$G_{\text{прот}} = 1000 \text{ кг}$ - масса противовеса;</p> <p>$v = 1 \text{ м/с}$ - скорость передвижения кабины;</p> <p>$ПВ = 60\%$ - продолжительность включения;</p> <p>Провести исследование переходных процессов пуска и остановки тихоходного асинхронного двигателя с нагрузкой в виде безредукторной лебедки.</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; содержательная, концептуальная, математическая структурная модель; разработка алгоритма решения задачи; выбор программного обеспечения; индивидуальные; дополнительные разделы, подлежащие разработке; заключение по работе).</i>	Литературный обзор лифтового оборудования; Математическое описание асинхронного двигателя и безредукторной лебедки; Выбор оборудования; Имитационное моделирование процессов разработанного электропривода в среде MATLAB Simulink
---	---

Перечень графического материала

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кузьмина Н.Г., старший преподаватель
«Социальная ответственность»	Дашковский А.Г., к.т.н., доцент
«Английский язык»	Пташкин А.С., к.ф.н., доцент

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ЭПЭО	Михальченко С.Г.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Палванов Р.Б.		

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

Студенту:

Группа 5ГМ5А	ФИО Палванову Роману Бахтияровичу
------------------------	---

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/Электроприводы и системы управления электроприводов

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

<i>1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): на специальное оборудование, зарплат, страховые отчисления, прочие и накладные расходы</i>	<i>Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Зарботная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы остальных статей расходов.</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Планирование и формирование графика работ по реализации ТП</i>	<i>Организация работ ТП</i>
<i>2. Формирование сметы</i>	<i>Смета затрат на проектирование</i>
<i>3. Оценка потенциала и перспективности реализации ТП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ полученных результатов</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Палванов Р.Б.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5ГМ5А	ФИО Палванову Роману Бахтияровичу
-----------------	--------------------------------------

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/ Электроприводы и системы управления электроприводов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования</i>	<i>Помещение закрытого типа с естественной и искусственной вентиляцией воздуха.</i>
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<i>Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 03.07.2016) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i>	<i>Вредные факторы, возникающие из-за ПЭВМ: электромагнитное и ионизирующее излучения, шум, вибрация.</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i>	<i>Опасные факторы: 1. Опасность электропоражения;</i>
<i>3. Охрана окружающей среды</i>	<i>Разработка и принятие решений по утилизации отходов</i>
<i>4. Безопасность в ЧС</i>	<i>Наиболее вероятная ЧС в здании - пожар</i>
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i>	<i>Использование оборудования согласно инструкции и ПУЭ. Социальное страхование работников.</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Палванов Р.Б.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 142 страницы, 30 рисунков, 12 таблиц, 58 источников, 6 приложений.

Ключевые слова: ТИХОХОДНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, ЛИФТ, БЕЗРЕДУКТОРНАЯ ЛЕБЕДКА.

Цель работы – провести расчет и исследование электропривода лифта по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором на основе безредукторной лебедки и выбрать необходимое оборудование.

В работе был проведен анализ лифтовых систем, выбран тихоходный асинхронный двигатель, безредукторная лифтовая лебедка и устройство управления.

Произведен расчет выбранного асинхронного двигателя и его механической системы. Построены механические и электромеханические характеристики ТАД.

Результаты исследования представлены в виде переходных характеристик, полученных с помощью разработанной имитационной модели в MATLAB R2014b, все расчеты получены с помощью программы MATHCAD 15.

Пояснительная записка выпускной квалификационной работы выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013.

Содержание

<u>ОПРЕДЕЛЕНИЯ</u>	11
<u>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</u>	13
<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	14
<u>1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР</u>	15
<u>1.1. Патентный обзор</u>	15
<u>1.2. Разновидности лифтовых установок</u>	19
<u>1.3. Устройство и принцип действия</u>	22
<u>1.4. Составление перечня измеряемых технологических переменных и управляющих воздействий, определение требуемой точности измерения и управления</u>	26
<u>1.5. Определение основных требований к ведению технологического процесса, формулирование критерия качества и цели управления</u>	27
<u>1.6 Основные требования к электроприводу</u>	28
<u>1.7 Лифтовые лебедки</u>	29
<u>1.8.Тихоходные (низкоскоростные, высокомоментные) асинхронные двигатели</u>	33
<u>1.8.1.Анализ тихоходного асинхронного двигателя</u>	34
<u>1.9. Преобразователи частоты для лифтовых механизмов</u>	37
<u>2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТИХОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛИФТОВОЙ ЛЕБЕДКИ</u>	40
<u>2.1 Математическое описание тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором</u>	40
<u>2.2 Математическое описание механической части</u>	47
<u>3. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ</u>	57

<u>3.1. Расчет мощности двигателя и его выбор</u>	57
<u>3.1.1. Построение механических и электромеханических характеристик</u>	58
<u>3.2. Выбор преобразователя частоты</u>	60
<u>3.3. Выбор безредукторной лифтовой лебедки</u>	66
<u>4. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА НА ОСНОВЕ ТИХОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ</u>	69
<u>4.1. Система относительных единиц</u>	69
<u>4.1.1. Имитация ТАД в неподвижной системе координат</u>	71
<u>4.2. Создание системы управления ТАД</u>	73
<u>4.2.1. Контур управления составляющими векторами тока статора</u>	75
<u>4.2.2. Контур управления потокосцеплением ротора</u>	77
<u>4.2.3. Контур управления частотой вращения</u>	78
<u>4.2.4. Контур управления положением</u>	79
<u>4.2.5. Задатчик интенсивности</u>	81
<u>4.2.6. Структурная схема нелинейной системы управления ТАД с векторным управлением с датчиком скорости</u>	81
<u>4.3. Имитационная модель тихоходного электропривода с учетом работы с безредукторной лифтовой лебедкой, выполненной в виде трехмассовой системы</u>	83
<u>5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ</u>	86
<u>5.1 Организация работ технического проекта</u>	86
<u>5.2 Смета затрат на проектирование</u>	89
<u>5.2.1 Материальные затраты</u>	89
<u>5.2.2 Затраты на амортизацию</u>	89

<u>5.2.3 Затраты на заработную плату</u>	90
<u>5.2.4 Затраты на социальные нужды</u>	91
<u>5.2.5 Прочие затраты</u>	91
<u>5.2.4 Накладные затраты</u>	91
<u>5.3 Анализ полученных результатов</u>	92
<u>6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ</u>	94
<u>6.1 Введение</u>	94
<u>6.2. Описание и анализ опасных и вредных факторов</u>	94
<u>6.2.1. Микроклимат в помещении</u>	95
<u>6.2.2. Шум и вибрация</u>	96
<u>6.2.3. Недостаточная освещенность</u>	97
<u>6.3. Анализ опасных факторов</u>	101
<u>6.3.1. Загорание (пожар)</u>	102
<u>6.3.2. Электропоражение</u>	104
<u>6.4. Разработка принятия решений по утилизации отходов</u>	106
<u>6.5. Предотвращение ЧС и устранение последствий</u>	108
<u>6.6. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</u>	110
<u>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</u>	112
<u>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</u>	114
<u>Приложение А</u>	120
<u>Приложение Б</u>	121
<u>Приложение В</u>	122
<u>Приложение Г</u>	123
<u>Приложение Д</u>	124
<u>Приложение Е</u>	125

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Асинхронный двигатель - электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

Баумак - специальное устройство для обеспечения положения узлов лифта относительно его направляющих.

Буфер - устройство амортизации и остановки движущейся кабины или противовеса при переходе крайних рабочих положений.

Лифтовая Лебедка - электромеханическое устройство, которое предназначено для создания тягового усилия, обеспечивающее вертикальное движение лифтовой кабины.

Лифт - стационарная грузоподъемная установка, работающая в повторно-кратковременном режиме; служит для транспортировки (подъема/спуска) людей или грузов.

Лифтовое оборудование - отдельные узлы, входящие в состав лифтовой установки.

Ловители - устройство безопасности, предназначенное для остановки и удержания кабины (противовеса) на направляющих при превышении рабочей скорости или обрыве тяговых элементов.

Машинное помещение – помещение, где размещается лифтовое оборудование.

Преобразователь частоты - это устройство, предназначенное для преобразования переменного тока (напряжения) одной частоты в переменный ток (напряжение) другой частоты.

Точность остановки кабины (точность остановки): расстояние по вертикали между уровнем пола кабины и уровнем этажной площадки после автоматической остановки кабины.

Шахта – пространство, где перемешаются части лифтовой установки: кабина, противовес, ловители.

Электрический привод - электромеханическая система для приведения в движение исполнительных механизмов рабочих машин и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АВ – автоматический выключатель.

ТАД – тихоходный асинхронный двигатель.

АИН – автоматический инвертор напряжения.

ВКР – выпускная квалификационная работа.

ГОСТ – государственный стандарт.

КВШ – канатоведущий шкив.

КПД – коэффициент полезного действия.

НИ – научное исследование.

НТИ – научно-техническое исследование.

НПБ – нормы пожарной безопасности.

ОС – окружающая среда.

ПВ – продолжительность включения.

ПУБЭЛ – правила устройства и безопасной эксплуатации лифтов.

ПЧ – преобразователь частоты.

ПФ – пенсионный фонд.

РФ – Российская Федерация.

СанПиН – санитарные правила и нормы.

СНиП – строительные нормы и правила.

СП – свод правил.

ТЭС – тепловая электростанция.

УЗО – устройство защитного отключения.

ФСС – фонд социального страхования.

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

ЭП – электрический привод.

ЭС – электроснабжение.

ВВЕДЕНИЕ

Лифт – это специальное транспортное средство, предназначенное для перевозки людей и грузов. С помощью лифта стали возможны длинные межэтажные перевозки, что нашло широкое применение в высотных зданиях и шахтах. Отличительной особенностью лифта от других средств перемещения является то, что управлять им может любой пассажир, находящийся в лифтовой кабине. Это стало возможным благодаря развитию автоматизированной техники.

Лифт является сложнейшим электромеханическим оборудованием, следовательно, к его проектированию предъявляются жесткие требования, которые регламентируются ПУБЭЛ - Правилами устройства и безопасности эксплуатации лифтов. За соблюдением всех требований и нормативов ПУБЭЛ, с момента установки и на весь период эксплуатации, следят органы Госгортехнадзора России и его региональные органы.

Существуют следующие типы лифтовых установок – электрические и гидравлические. Наибольшее использование получили, естественно, электрические лифты.

Основой электрического лифта является его подъемный механизм – электропривод. Также, существует множество способов исполнения лифтовых систем.

В данной работе будут рассмотрены существующие системы лифтовых установок, описаны перспективы развития, будет разработан регулируемый электропривод с использованием безредукторной лифтовой лебедки, построены механические и электромеханические характеристики выбранного электродвигателя, подтверждение адекватности результатов проектирования будет представлено в виде имитационной модели данного электропривода с механической частью.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Патентный обзор

1) Безредукторный привод лифтовой лебедки

Официальная публикация

патента РФ № 2435283. Авторы: Голембиовский Михаил Иванович (RU), Захаров Алексей Вадимович (RU), Кобелев Андрей Степанович (RU), Кругликов Олег Валерьевич (RU), Макаров Лев Николаевич (RU), Родионов Роман Вячеславович (RU)

Патентообладатель: Открытое Акционерное Общество "Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Электромашиностроения" (RU)

Описание: Изобретение относится к асинхронным двигателям специализированного назначения по системе управления ПЧ-АД с короткозамкнутым ротором с обеспечением высокого момента при низкой частоте вращения. Изобретение позволит повысить энергетические и массогабаритные качества электропривода.

«Это достигается тем, что в асинхронном двигателе комплексно применяются: полуоткрытые до 2,2 мм пазы ротора специальной конструкции без скоса с переходом на высоте 1 мм к широкой части верхушки паза; пазы статора, имеющие арочную конструкцию верхней части паза и максимальное открытие до 4 мм, при соблюдении условий, что число пар полюсов $2p=6-12$ выбирается так, чтобы частота питающего напряжения была не ниже 4 Гц, с жесткой увязкой соотношения чисел пазов ротора 66-130 и статора 54-108 при числе пазов ротора, большем числа пазов статора на 20%; обмотка статора с числом пазов на полюс и фазу не менее 2; магнитная система, изготовленная из стали, обладающей высокими значениями индукции без привязки к величине удельных потерь. Технический результат, достигаемый при использовании настоящего изобретения, состоит в улучшении энергетических

показателей и повышении перегрузочной способности электродвигателя, в том числе и при его работе в генераторном режиме.» [1]

2) Привод лифта.

Официальная публикация патента РФ № 2359900. Авторы: Едиханов Тимур Филаритович (RU), Новиков Виктор Алексеевич (RU), Милько Роман Эдуардович (UA), Милько Юрий Романович (UA).

Патентообладатель: ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "МЕЖРЕГИОНТЕХНОЛОГИЯ" (RU)

Настоящее изобретение относится к отрасли лифтостроения, однако может быть использовано и в других отраслях при создании прямых (безредукторных) электроприводов производственных механизмов различного назначения.

Сущность изобретения. [2]

«Поставленная цель достигается тем, что в безредукторном электроприводе лифта, содержащем асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, канатоведущий шкив и тормозную систему, асинхронный электродвигатель выполнен с электрической редукцией, которая образована тем, что обмотка статора состоит из i отдельных двухслойных обмоток (i - целое число не менее 2), рассчитанных на полное напряжение питания, гальванически не связанных и изолированных друг от друга, каждая из них занимает $1/i$ -ю часть окружности статора, внешние стороны секций каждой обмотки, образующих ее крайние полюсы, уложены совместно с внешними сторонами секций смежных обмоток в общие пазы статора, причем полюса смежных обмоток на стыке обмоток являются разноименными.

При этом обеспечивается следующий технический эффект.

При параллельном подключении обмоток к питающей сети вдоль дуги статора, занятой каждой обмоткой, образуется локальное «бегущее» магнитное поле, скорость которого определяется числом полюсов обмотки и которое, взаимодействуя с ротором, создает крутящий момент, действующий

на участке статора, занятом этой обмоткой. Крутящие моменты всех обмоток суммируются, а скорость вращения ротора двигателя менее скорости «бегущего» магнитного поля одной обмотки во столько раз, во сколько раз длина окружности расточки статора больше дуги, занимаемой одной обмоткой, т.е. равно числу отдельных обмоток (i).

Ротор асинхронного электродвигателя с электрической редуцией скорости вращения выходного вала может быть любого типа: короткозамкнутый, типа «беличье колесо», массивный ферромагнитный или из немагнитного металла с высокой проводимостью (медь, алюминий и т.п.). Обмотки статора могут быть выполнены многофазными или однофазными любого типа, обязательным условием является то, что они должны создавать «бегущее» (вращающееся) магнитное поле и быть двухслойными.

Тормозная система электропривода лифта обычно содержит тормозной шкив (или диск) и механический, обычно пружинный, тормоз с электромагнитным растормаживанием.»

3) Асинхронный двигатель для низкоскоростного безредукторного электропривода.

Патентный поиск по классам МПК-8: Класс H02K17/02 асинхронные двигатели. Авторы: Каган А.В.

Патентообладатель: Северо-Западный заочный политехнический институт.

«Изобретение относится к области электротехники, а именно - к электрическим машинам, и может быть использовано для низкоскоростных безредукторных асинхронных электроприводов, механизмов и установок различного назначения. Сущность изобретения состоит в том, что каждая фаза обмотки статора состоит из двух последовательно-встречно соединенных частей, одна из которых выполнена из катушек с диаметральной шагом, а другая - с относительным шагом b , определяемым по формуле: $b=1-1/k$, где k - натуральное нечетное число больше 3, определяющее коэффициент

понижения частоты вращения двигателя. Данное изобретение обеспечивает повышение степени тихоходности асинхронных двигателей органического диаметра.» [3]

4) безредукторный лифт с тросовым приводом.

Официальная публикация
патента РФ № 2278812.

Авторы: ВИТТУР Хорст (DE), КЮНЧЕР Дитмар (DE), ФИХТНЕР Клаус (DE).

Патентообладатель: Виттур АГ (DE).

Изобретение относится к подъемному оборудованию, в частности к конструкциям лифтов, привод которых не содержит редуктора. Лифт имеет тросовый привод, устанавливаемый не в машинном отделении, имеющий приводной шкив, на который дважды навито несколько параллельных стальных несущих тросов, контршкив, кабину, направляющие кабины и противовес. Несущие тросы проходят по полукруглым канавкам. Соотношение между диаметром приводного шкива и номинальным диаметром несущих тросов составляет <40 . Изобретение позволяет сократить габариты привода и его стоимость.[4]

5) способ поэтапного управления электроприводом лифта с учетом влияния упругостей тросов

Авторы: Добробаба Ю.П. (RU), Сафронович А.И. (RU);

Патентообладатель: Кубанский государственный технологический университет (RU)

Патентный поиск по классам МПК-8:Класс В66В1/24 регулируемые системы управления, те системы с обратным действием для изменения скорости, ускорения или замедления движения.

Изобретение относится к регулируемым системам управления с обратным действием для изменения скорости, ускорения или замедления движения и может использоваться для улучшения динамических

характеристик лифтов. Техническим результатом изобретения является повышение эффективности работы, точности выполнения задания и комфорта при движении лифта. Для этого способ осуществляют путем управления и кабиной, и противовесом по оптимальному закону с противоположными динамическими характеристиками. На закон движения накладывают ограничения по скорости, первой производной скорости, второй производной скорости, третьей производной скорости и четвертой производной скорости. В процессе движения скорость и ее производные достигают и удерживаются на максимально допустимых уровнях в течение рассчитанного времени. Оптимальный закон движения реализуется поэтапно и состоит из 31 этапа. Для реализации оптимального закона движения вводят второй двигатель, который посредством одного из тросов воздействует либо на кабину в случае, если масса противовеса превосходит массу кабины, либо на противовес в случае, если масса кабины превосходит массу противовеса, в направлении действия силы тяжести. Для выполнения оптимального закона движения и кабиной, и противовесом задающие воздействия для каждого из двигателей рассчитывают отдельно с учетом упругих деформаций тросов.[5]

1.2. Разновидности лифтовых установок

Так как лифты нашли применение в многих отраслях современной жизни, появилось много разновидностей лифтовых установок [6].

Классификация лифтов:

- По назначению:
 - пассажирский - предназначен только для транспортировки людей;
 - грузопассажирский – применяется для перемещения людей и грузов;
 - больничный – специализирован для использования в медицинских учреждениях для перевозки больных;
 - грузовой - используется только для транспортировки грузов;

- специальный (нестандартный) – изготовлен по индивидуальным техническим предпочтениям, применяется для особых условий эксплуатации.

- по типу исполнения привода подъемного механизма:

- электрические – с применением электропривода постоянного или переменного тока;

- гидравлические - привод выполнен в виде гидроцилиндра или лебедки с гидродвигателем вращательного типа.

- по механизму передачи движения кабине:

- канатные – перемещение кабины с помощью тяговых канатов;

- цепные, реечные и винтовые – перемещение кабины с помощью тяговых цепей.

- по способу передачи движения от канатоведущего органа лебедки тяговым канатам:

- лифты с барабанной лебедкой;

- лифты с канатоведущим шкивом (КВШ)

- по способу воздействия канатов на кабину:

- лифты с верхней канатной подвеской кабины;

- выжимные, в которых тяговые канаты охватывают кабину снизу.

- по схеме запасовки тяговых канатов:

- лифты с прямой, с полиспастной подвеской кабины;

- с канатным мультипликатором.

- по расположению машинного помещения различаются лифты:

- с верхним машинным помещением;

- с нижним машинным помещением.

- по конструкции привода лебедки:

- редукторный привод;

- безредукторный привод;

- По скорости движения кабины:
 - тихоходные – скорость движения кабины до 1 м/с ;
 - быстроходные - скорость движения кабины 1,4–2 м/с ;
 - скоростные - скорость движения кабины ≥ 2 м/с .
- по точности остановки кабины:
 - точная система остановки;
 - без системы точной остановки.

Основные параметры технических характеристик лифта:

- грузоподъемность;
- скорость движения;
- высота подъема кабины.

Под грузоподъемностью лифта понимают максимальную массу, находящуюся в кабине, которую может поднять лифт.

Вместимость кабины определяется следующим образом:

$$E = \frac{Q}{Q_{\Pi}},$$

где Q – расчетная грузоподъемность кабины, кГ;

Q_{Π} - средняя масса одного пассажира. Обычно расчетная масса пассажира принимается в среднем 80кг.

Существует стандартный ряд величин 0,25; 0,5; 0,71; 1; 1,4; 1,6; 2; 2,8; 4, 5,6; 7; 8 м/с. определяющий номинальную скорость кабины, то есть скорость при нормальном режиме работы

Остановочная скорость - скорость, на которой обеспечивается максимальная точность остановки.

Ревизионная скорость – это скорость, которую использует обслуживающий персонал для технического оборудования шахты лифта с крыши движущейся кабины. Если скорость лифта менее 0,7 м/с, то ревизия может быть выполнена при движении кабины на номинальной скорости.

Предельная скорость - аварийная скорость, при которой срабатывают ловители.

Высота подъема определяется согласно с конструкцией здания, но имеет ограничение в виде увеличения потерь полезного объема высотных зданий.

Производительность лифта – один из самых важных параметров. Она зависит от высоты здания, грузоподъемности, интенсивностью включения и т.д.

1.3. Устройство и принцип действия

Основные части лифта: кабина, противовес, электропривод лебедки, ограничитель скорости, тяговые канаты, направляющие кабины, электрооборудование и электрическая разводка.

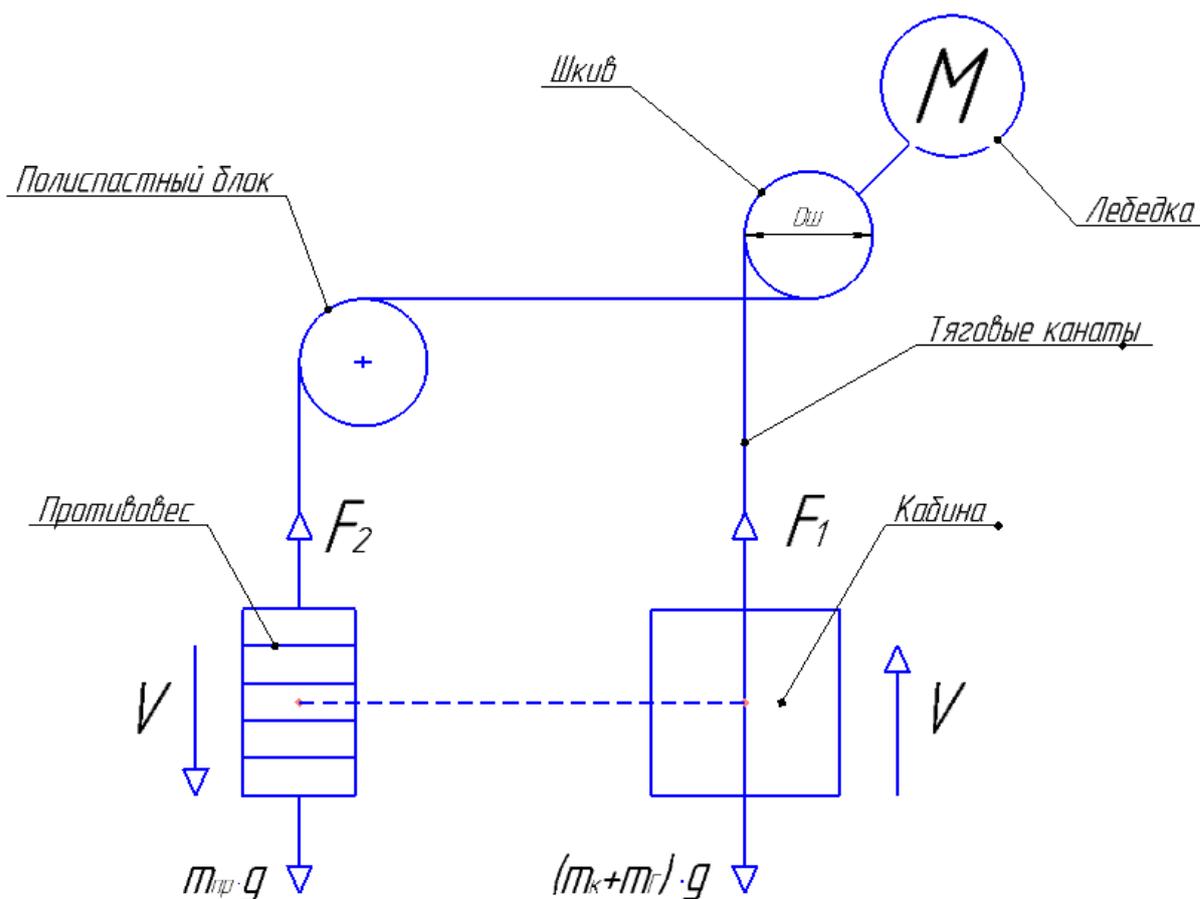


Рисунок 1 – Кинематическая схема лифта

Описание кинематической схемы (рис.1). Тяговые канаты с КВ, огибая полипастный блок на кабине и противовесе, крепятся к в машинном отделении к верхнему перекрытию шахты

С помощью лифтовой лебедки производится движение кабины и противовеса посредством тяговых канатов. Также в машинном помещении располагаются тормозное устройство, станция управления, включающая в себя устройство ввода, сервоконтроллер, устройства защиты и т.д.

Управление кабиной лифта доступно любому пассажиру. При нажатии кнопки вызова лифта, в станцию управления поступает управляющий сигнал. Контроллер, получая сигнал, формирует задание: если кабины находится на этаже вызова лифта, то подается сигнал на открывание дверей; если кабина находится на другом этаже, то подается команда на движение кабины к этажу вызова. Если кабина на момент вызова находится в движении, то задание формируется в зависимости от того в какую сторону движется лифт, если лифт движется в попутном направлении, то происходит остановка на этаже вызова и лифт продолжает движение; если лифт движется в противоположном направлении (от этажа вызова), то полученный сигнал сохраняется, а команда на движение к данному этажу будет подана после завершения движения по уже имеющейся команде.

Для точной остановки кабины и комфортности пассажиров применяют датчики точной остановки. Этот датчик находится на определенном расстоянии от этажа, в зависимости от номинальной скорости кабины. Сигнал с датчика точной остановки переводит электропривод на пониженную частоту вращения. Далее подается команда на остановку, а в момент совмещения уровня пола кабины и этажа, осуществляется остановка, включается тормоз, двери открываются. В нашем случае, применение безредукторной лебедки и преобразователя частоты исключают ступенчатую остановку или разгон, благодаря широкому диапазону регулирования скорости. [7]

Лифт относится к электрооборудованию повышенной безопасности. Чтобы исключить возможность запираания пассажиров в кабине, внезапных

остановок вне уровня этажа, движение кабины осуществляется при исправности всех уровней системы, блокировочных, предохранительных устройств. При любых неполадках движение лифта невозможно, так как сигналы с предохранительных устройств размыкают системы кнопочного управления в кабине и на этажах (кроме аварийной кнопки и кнопки для связи с диспетчером).

Основным элементом лифта является механизм подъема – электропривод лифтовой лебедки.

Перемещение пассажиров производится в кабине лифта. Кабина представляет собой небольшое помещение без окон и других открытых частей. В кабине имеются блокировочные устройства, которые исключают возможность движения с открытыми створками дверей.

Для борьбы с поперечным раскачиванием кабины во время движения, применяют специальные направляющие, которые устанавливаются на всю высоту лифтовой шахты. При аварийном режиме эти направляющие обеспечивают торможение кабины с помощью ловителей с последующим удержанием кабины до её снятия с ловителей. Но понятие «обрыва» лифта давно ушло в прошлое, так как современное оборудование практически исключает возможность обрыва. Однако, обеспечение безопасности перевозки пассажиров всегда оставалось и остается главным приоритетом, поэтому механизм аварийного останова кабины всегда будет существовать. Принцип работы ловителей: при скорости достижения скорости кабины выше предельной скорости срабатывает ограничитель скорости, который посылает сигнал на срабатывание ловителей. Ловители устанавливаются по боковым сторонам каркаса кабины (противовеса) и приводятся в действие канатом, охватывающим шкив ограничителя скорости.

Приямок – это самая нижняя часть шахты лифта, там размещается защитное оборудование: упоры или буферы для ограничения скорости кабины.

Станция управления находится в машинном помещении. Машинное отделение может располагаться на самом верхнем этаже здания или в подвале. Электрическое соединение оборудования лифтовой кабины со станцией управления обеспечивается с помощью подвесного кабеля, смонтированного в лифтовой шахте.

Большая часть датчиков тоже устанавливается в лифтовой шахте. Среди них: датчик точной остановки, датчики замедления, устройство контроля дверей кабины.

На рисунке 2 представлена схема размещения лифтового оборудования. Шкаф управления, электропривод, лебедка – располагаются в машинном помещении. Кабина, противовес, канаты, направляющие, ловители и датчики – располагаются в лифтовой шахте.

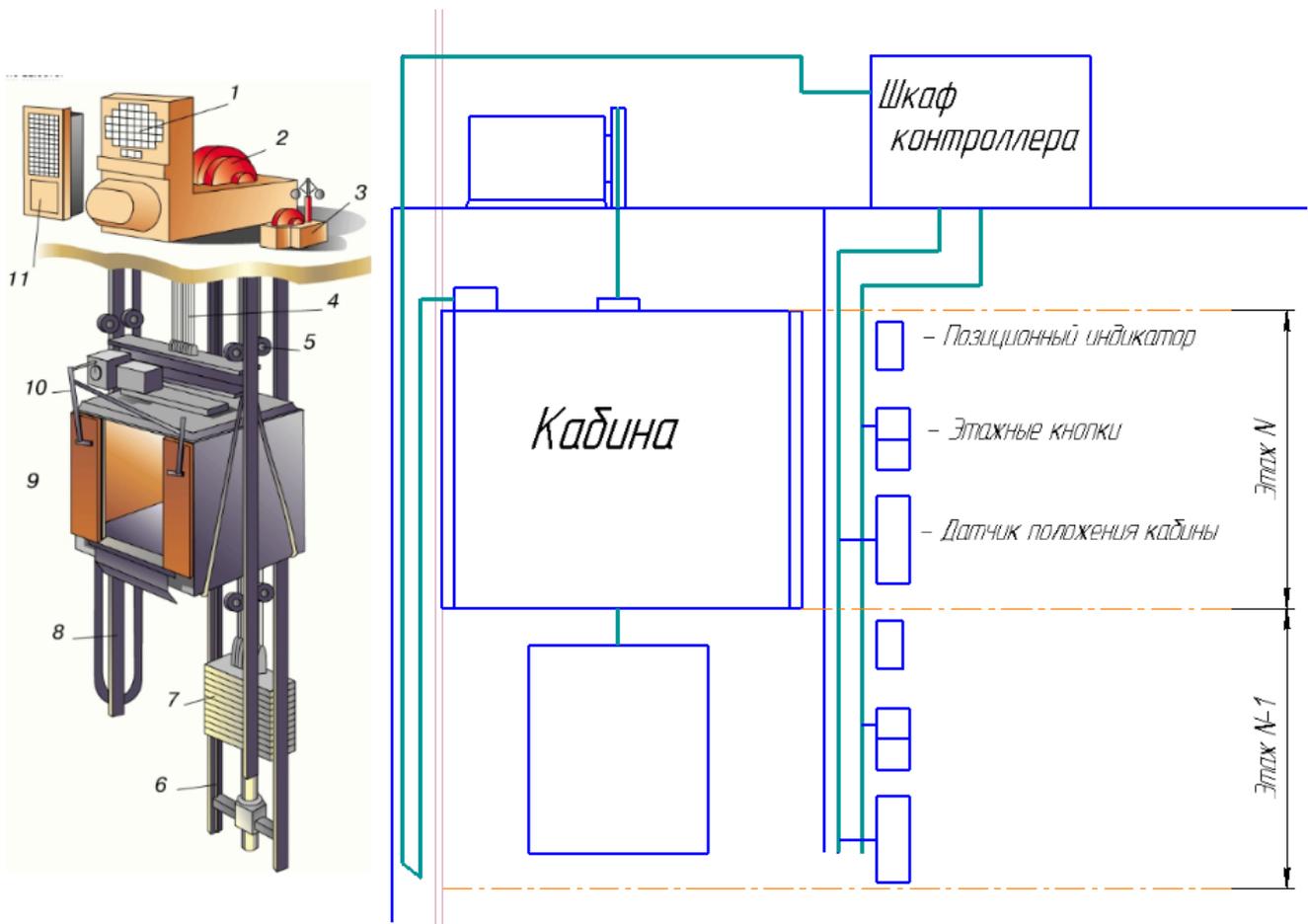


Рисунок 2 – Технологическая схема оборудования

На рисунке приняты следующие обозначения:

1 – станция управления, в нашей работе будет использоваться преобразователь частоты;

2 – электродвигатель, в нашей работе будет использоваться тихоходный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;

3 – система управления тормозом;

4 – трос подвеса кабины;

5 – направляющие ролики;

6, 8 – направляющие рельсы;

7 – противовес;

9 – кабина;

10 – привод дверей кабины;

1.4. Составление перечня измеряемых технологических переменных и управляющих воздействий, определение требуемой точности измерения и управления

Так как главным элементом лифтового оборудования является электропривод лебедки, то почти все переменные состояния будут связаны именно с ним, перечислим основные из них [11]:

- Постоянно меняющийся вес кабины в зависимости от количества пассажиров, следовательно, постоянно меняющийся момент на валу двигателя;
- Положение кабины в шахте лифта, следовательно, угол поворота шкива. Изменяющиеся токи и напряжения на двигателе;
- Скорость передвижения лифтовой кабины.

Таким образом, чтобы с высокой точностью управлять кабиной лифта, нам необходимо оперировать данными переменными.

Управление осуществляется в несколько уровней. Для управления электроприводом лебедки используется преобразователь частоты, реализующий векторное управление асинхронным двигателем, которое позволяет управлять скоростью двигателя в очень широком диапазоне, что обеспечивает плавные разгон и остановку кабины. Управление может осуществляться автономно посредством одного только преобразователя частоты, но такая система является ненадежной и не используется в лифтовых установках. Формирование задания для электропривода осуществляется с помощью микроконтроллера или сервоконтроллера специального исполнения, который в свою очередь сообщается со станцией оператора ПЭВМ. Именно контроллер, получая сигналы с датчиков, формирует наилучшее задание на движение главному электроприводу и электроприводу дверей. А также сигналы о неисправностях и авариях немедленно отправляются на станцию диспетчера.

1.5. Определение основных требований к ведению технологического процесса, формулирование критерия качества и цели управления

Главное задачами управления кабиной лифта являются обеспечение комфортного движения и точность остановки на требуемом уровне этажа.

Основные критерии качества [11]:

- Плавность движения. Согласно ПУБЭЛ, для комфортной перевозки людей требуется величина ускорения кабины не более (2 м/с^2).

Физический эффект на тело человека зависит от времени действия ускорения. При длительности ускорения менее 0,4с. организм человека удовлетворительно переносит ускорения до $30-40 \text{ м/с}^2$. Следовательно, при управлении движением кабины допускается кратковременное высокое ускорение или замедление.

Комфортабельность лифта определяет не только ускорение, но другими факторами. Рассмотрим каждый из них:

Время ожидания лифта – время, которое пассажир ожидает лифт на лестничной площадке. Если здание высотное, то имеет смысл включить в управление функцию повышенной скорости при движении пустой кабины. В нашем случае здание невысокое, поэтому достаточно движения кабины с номинальной скоростью.

Плавность и точность остановки осуществляется с помощью датчиков точной остановки. При достижении этажа остановка подается сигнал на снижение скорости, а так как мы используем безредукторный электропривод с векторным управлением с помощью преобразователя частоты, то возможность настройки плавной остановки не составит труда.

Наличие шумов при передвижении тоже является показателем комфортности. В сравнение с редукторными приводами, безредукторный электропривод обладает минимальным уровнем шума механических частей.

1.6. Основные требования к электроприводу

Так как электропривод является главным органом лифтового оборудования, то перед проектированием необходимо сформулировать основные требования, предъявляемые к электроприводам лифтовых установок пассажирского исполнения [9]:

- Надежность, высокий уровень безопасности;
- Малошумность;
- Простота эксплуатации;
- Ограничение ускорения кабины;
- Плавность начала движения и остановки;
- Наличие ревизионной скорости;
- Точность остановки на уровне этажа;

1.7. Лифтовые лебедки

Лифтовой лебедкой называют механизм для приведения в движение кабины лифта. Контроль качества и безопасности лифтовых лебедок обеспечивает ПУЭБЭЛ [41].

Требования ПУЭБЛ:

- Лебедка и части её конструкций должны выдерживать максимальные нагрузки при эксплуатации лифта.
- Барабанные лебедки и лебедки со звездочкой допускается использовать на скорости не более 0,63 м/с. Использование противовеса в сочетании с такими лебедками – запрещено.
- Между тормозным шкивом и канатоведущим органом лебедки должна быть не размыкаемая кинематическая связь;
- Лебедка оборудована струбциной, чтобы перемещать кабину при отключении электропитания;
- Штурвал может быть съёмного или несъёмного исполнения. Недопустимо применение кривошипной рукоятки. Съёмный штурвал должен храниться в машинном помещении;
- На штурвале должна быть соответствующая маркировка, показывающая принадлежность к конкретной лебедке;
- На лебедке обязательно указывается направление кабины при повороте штурвала;
- В машинном помещении должна быть возможность контроля положения кабины.

Наиболее распространенный привод в лифтовой индустрии – электропривод на основе асинхронного двигателя. Асинхронные двигатели являются самыми надежными в эксплуатации, а с появлением преобразователей частоты, асинхронный привод шагнул далеко вперед в сфере управления скоростью вращения. Частотное и векторное управление позволяет получать впечатляющие диапазоны регулирования. Учитывая все это достоинства,

электропривод на основе асинхронного двигателя постепенно вытеснил использование приводов с двигателями постоянного тока. Асинхронный двигатель по своим качествам уступает только синхронному двигателю с постоянными магнитами, но развитие приводом на основе этих двигателей только началось и пройдет еще немало времени, когда синхронные двигатели смогут вытеснить асинхронные на мировом рынке [38].

Лифтовые привода с гидродвигателем вращательного типа используют только для зданий малой этажности. В России гидродвигатели не получили развития в лифтостроении.

По типу применяемого канатоведущего органа различают лебедки барабанного типа (рис. 3, а), с канатоведущим шкивом (рис. 3, б) и звездочкой. В качестве канатоведущего органа современных лифтов обычно применяют канатоведущий шкив, что обуславливается причинами, рассмотренными ниже.

По характеру кинематической связи между двигателем и канатоведущим органом лебедки подразделяют на безредукторные (рис. 4) и редукторные. Редукторными называются лебедки, у которых канатоведущий орган приводится в движение от двигателя через редуктор. Редуктор — это механизм, преобразующий движение с изменением частоты вращения и моментов. С помощью редуктора можно уменьшить частоту вращения его рабочего органа относительно частоты вращения приводного механизма, а также увеличить момент на рабочем органе.

Безредукторные лебедки (рис.4) применяются в высокоскоростных лифтах или в лифтах повышенной комфортности. Канатоведущий и тормозной шкивы размещаются на валу тихоходного электродвигателя. Чтобы использовать безредукторную лебедку, применяют преобразователи частоты для бесступенчатого регулирования скорости кабины в широком диапазоне. Это позволяет качественно повысить плавность пуска и остановки. На данный момент Российскими лифтостроительными заводами выпускаются

пассажирские лифты со скоростью движения кабины до 4 м/с.

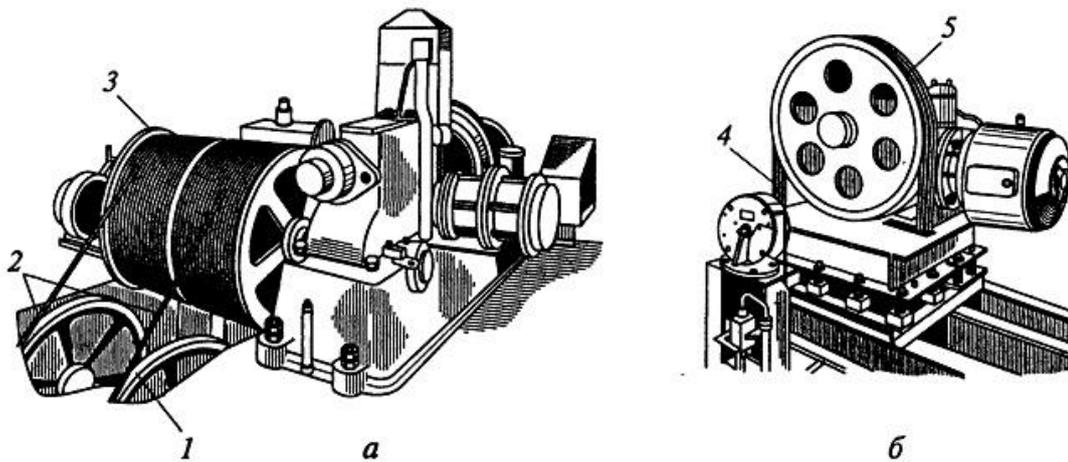


Рисунок 3 - Лебедки: а — барабанного типа; б — с канатоведущим шкивом; 1 — отклоняющий блок; 2, 4 — канаты; 3 — барабан; 5 — канатоведущий шкив

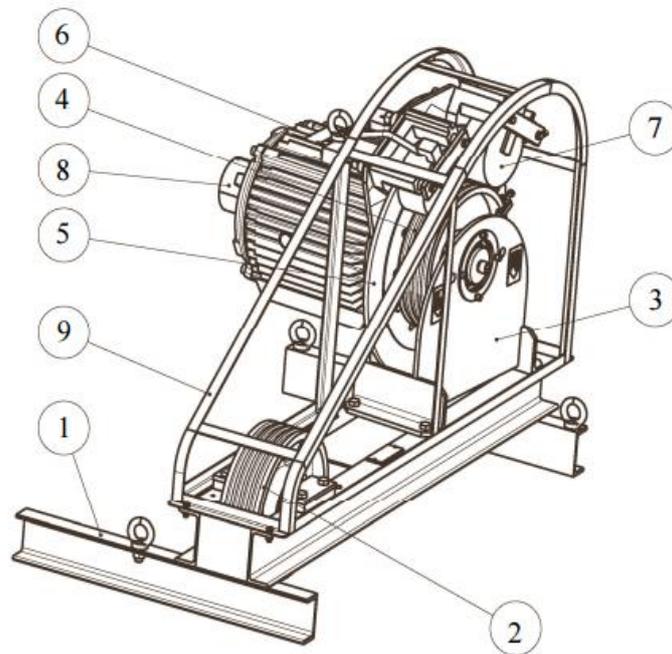


Рис. 4. Безредукторная лебедка с тихоходным асинхронным электродвигателем переменного тока:

1 — рама; 2 —отводной блок; 3 — опора привода; 4 — канатоведущий шкив; 5 — тормозной диск; 6 — электродвигатель; 7 — электромагнитный тормоз; 8 – датчик обратной связи по скорости (энкодер); 9 – ПЧ и блок тормозных резисторов

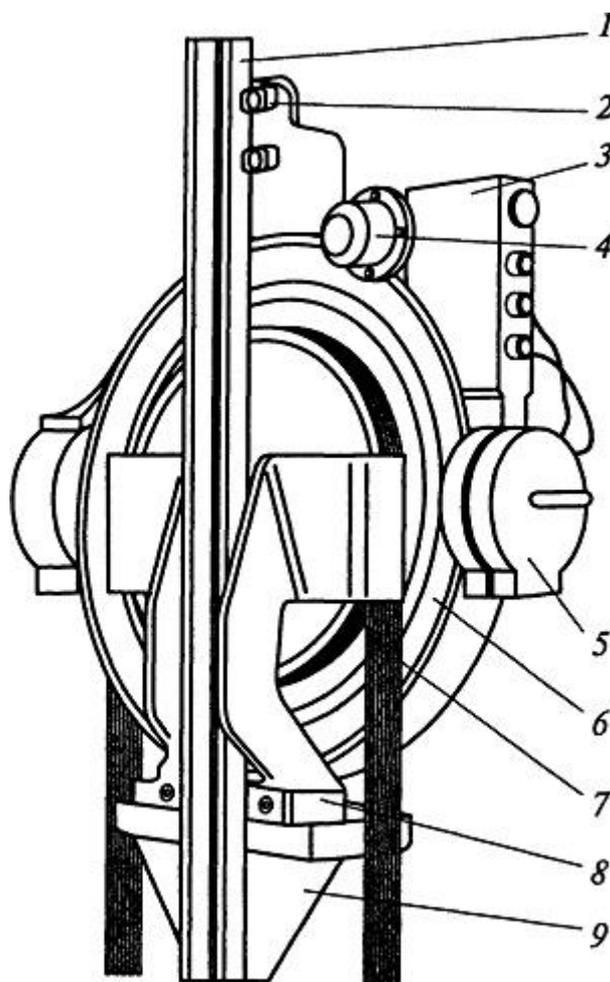


Рис. 5. Безредукторная лебедка с дисковым электродвигателем переменного тока EcoDisk:

1 — направляющая кабины; 2, 8 — прижимные планки крепления лебедки; 3 — клеммная коробка; 4 — тахогенератор системы управления работой двигателя; 5 — растормаживающий электромагнит; 6 — дисковый ротор с канатоведущим и тормозным шкивами; 7 — тяговые канаты; 9 — корпус лебедки

1.8. Тихоходные (низкоскоростные, высокомоментные)

асинхронные двигатели

В настоящее время в лифтовой индустрии большинство электроприводов лифтовых лебедок выполняют из двухскоростного асинхронного двигателя с КЗ, редуктора, тормозного устройства и релейно-контакторной схемы управления.

Основным недостатком можно назвать низкую надежность релейно-контакторных схем управления, которые в свою очередь приводят к отклонению параметров настройки, что сказывается на асинхронном двигателе в виде увеличения бросков тока при пуске. Недостатком механической части являются жесткие механические характеристики и высокие динамические моменты, возникающие из-за той же несовершенной системы управления [35].

В связи с прогрессом в развитии полупроводниковых приборов и микропроцессорной техники, появились системы частотно-регулируемого электропривода переменного тока. Это повлекло за собой тенденцию к переходу от редукторного электропривода к безредукторному на основе системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель. Основными преимуществами безредукторного электропривода являются:

- Отсутствие редуктора – то есть, существенное уменьшение механической части;
- Высокая комфортность – повышение комфортности в виду уменьшения шумов, плавности пуска и останова;
- Низкий уровень шума и вибраций– за счет исключения редуктора уменьшились механические шума и вибрации при перемещении кабины.

Самым эффективным направлением развития безредукторных электроприводов и безредукторных лифтовых лебедок является применение

низкоскоростного высокомоментного асинхронного двигателя (тихоходного асинхронного двигателя – ТАД).

Электропривод, выполненный на основе тихоходного асинхронного двигателя, сильно отличается от общепромышленных приводов. Основными показателями ТАД является низкая номинальная скорость вращения вала (50-300 об/мин), существенно высокий момент, низкая частота напряжения статора, уменьшение кратности пусковых токов в 2-3 раза.

Кроме того, применение для управления ТАД цифровой системы на базе современных микропроцессоров и микроконтроллеров дает возможность реализации гибких алгоритмов управления электроприводом лифтовой лебедки и обеспечивает необходимые характеристики электропривода, заданную точность позиционирования кабины в начале движения и при полном останове и более высокую комфортабельность лифта.

1.8.1. Анализ тихоходного асинхронного двигателя

Как было сказано ранее, применение двигателей общепромышленного назначения с целью обеспечения работы на очень низкой частоте вращения и обеспечении высоких моментов, крайне неэффективно. Чтобы решить эту задачу, необходимо создание специального двигателя, обладающего отличительными особенностями от двигателей серийного производства.

Одной из главных особенностей работы двигателя при относительно малых частотах (ниже 5-10 Гц), являются потери в обмотках статора и ротора.

Механические потери и потери в стали составляют малую часть благодаря малой частоте питания и низкой частоты вращения, следовательно, в практических расчетах этими потерями можно пренебречь.

Поэтому, основными требованиями к применяемой стали являются не удельные потери, а возможность работы магнитной системы при повышенных индукциях с наименьшим током намагничивания. Это позволяет снизить потери в меди статора за счет снижения потребляемого от преобразователя тока [33].

«Для повышения перегрузочной способности двигателя должны быть приняты меры по снижению активных и индуктивных сопротивлений ротора и статора. В роторе уменьшение индуктивного сопротивления X_R достигается за счет уменьшения высоты паза и за счет его раскрытия. Кроме того, уменьшение R_R и X_R достигается за счет выбора числа пазов ротора большим, чем принимаемое в общепромышленных двигателях соотношением:

$$\frac{Z_R}{Z_S} \geq 1,2.$$

Количество полюсов статора выбирается из условия, чтобы частота

питания было не ниже 4 Гц. Конструкция паза статора должна обеспечивать оптимальное сочетание проводимости рассеяния и проводимости основного потока с целью максимизации рабочего момента. Паз должен быть максимально широким и иметь максимально допустимое раскрытие. Количество пазов статора должно обеспечивать значения q не менее 2. Конструкция обмотки должна обеспечивать наименьшую длину лобовых частей. Это достигается оптимальным укорочением двухслойной обмотки или применением «развалки» при однослойной обмотке». Основные соотношения чисел пазов статора и ротора высокомоментного асинхронного двигателя, питаемого от низкочастотного преобразователя частоты, приведены в таблице.

Таблица 1 – Основные соотношения чисел пазов

$2p$	Z_S	Z_R	q
6	54	66	3
6	72	86	4
8	72	86	3
8	96	114	4
10	60	74	2
10	90	108	3
12	72	86	2
12	108	130	3

«Применение овального паза ротора (см. рис.6) позволяет значительно уменьшить величину индуктивного сопротивления рассеяния, за счет раскрытия паза ротора до 2,2 мм, с переходом на высоте 1 мм к широкой части верхушки паза, что при сочетании чисел пазов ротора и статора, обозначенного в таблице, повышает величину максимального момента, увеличивая перегрузочную способность двигателя. Последнее особенно важно для пуска лифтовых электродвигателей, обладающих значительным моментом инерции. Отсутствие скоса уменьшает добавочные потери от поперечных токов высших гармоник при числе пазов ротора, большем числа пазов статора, одновременно это снижает значение X_R . Это позволяет улучшить энергетические характеристики электродвигателя и повысить его перегрузочную способность, как в двигательном, так и в генераторном режиме.» [33].

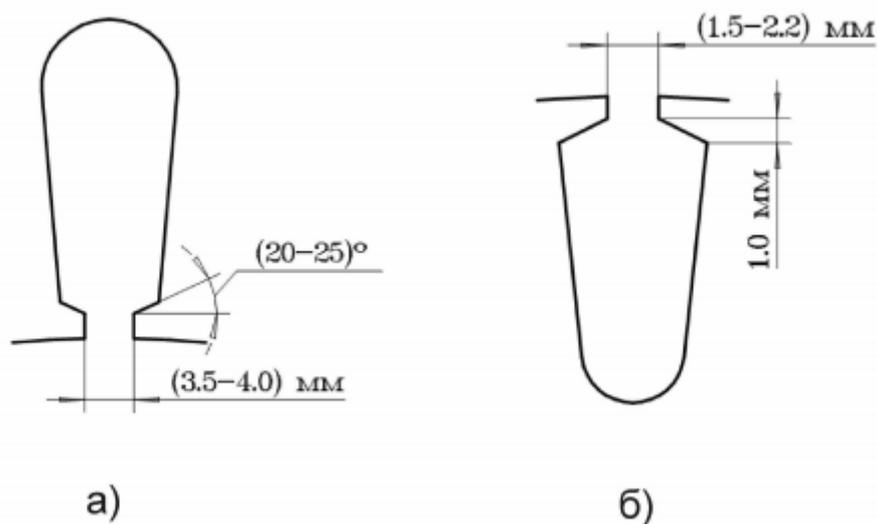


Рисунок 6 – Пазовая геометрия: а) паз статора; б) Паз ротора

«Конструкция паза статора изображена на рис. 6,а.. Данная конструкция с раскрытием паза до 4 мм преследует цель уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния паза. Закругление верхней части паза – арочная конструкция - обеспечивает большую жесткость магнитной системы. Это улучшает вибро-акустические характеристики двигателя, что особенно важно при отсутствии скоса пазов ротора, а также обеспечивает наибольший

коэффициент заполнения паза, что позволяет уменьшить активное сопротивление статора, уменьшить активные потери и увеличить теплоотдачу от наиболее нагретой части двигателя – обмотки статора. Все это также способствует повышению максимального момента двигателя. Создание оптимального высокоэффективного двигателя при питании от низкочастотного преобразователя частоты обеспечивается всем комплексом предлагаемых технических решений. Применение только одного из перечисленных решений не позволит получить требуемые характеристики.»

1.9. Преобразователи частоты для лифтовых механизмов

Появление на рынке преобразователей частоты сильно изменило техническое развитие в лучшую сторону. Благодаря им стало возможным высокое качество регулирования скорости асинхронных электродвигателей, по сравнению с системами ТРН-АД и другими системами, основанными на регулировании скорости посредством изменения напряжения на обмотках статора.

Применение преобразователей частоты в лифтовом электроприводе позволило устранить высокие пусковые токи при старте и остановке, точную остановку кабины на уровне этажа. В связи с улучшением всей системы движения кабины, улучшается срок службы механических частей: тяговых канатов, направляющих, подвески противовеса, тормозных колодок, электропроводки. А главное для нас то, что преобразователи частоты позволяют отказаться от использования редуктора путем использования безредукторной лебедки в сочетании с тихоходным асинхронным двигателем или синхронным двигателем с постоянными магнитами.

Так как процесс управления передвижением кабины лифта - довольно сложный процесс, то использовать преобразователи частоты общепромышленного исполнения является нецелесообразным. Перечислим

ряд дополнительных требований, предъявляемых к лифтовым преобразователям частоты [13]:

- Возможность формирования номинального момента с нулевой скорости, улучшение динамических характеристик за счет векторного управления асинхронным двигателем;
- Многофункциональность, возможность работать асинхронными и синхронными двигателями, с двигателями специального исполнения (ТАД) для работы с использованием безредукторной лебедки;
- Обязательное наличие S-образного задатчика интенсивности для обеспечения плавного разгона и торможения двигателя;
- Интерфейс и программное обеспечение преобразователя частоты должны учитывать особенности условий применения: управление тормозом двигателя, контактором, поддерживать связь с сервоконтроллером;
- Наличие функции аварийного довода кабины до ближайшего этажа при срабатывании предохранительных защитных систем;
- Возможность переключения питания на резервный источник питания, при аварийном отключении основного источника;
- Повышенная надежность;
- Возможность рекуперации энергии в сеть при работе в тормозных режимах;
- Преобразователь должен соответствовать нормам по электромагнитной совместимости, предъявляемым к лифтовым электроприводам жилых зданий;

Требование много функциональности сформировалось в связи с широким развитием безредукторных частотно-регулируемых электроприводов. Безредукторные привода нашли применение в высокоскоростных лифтах и в лифтах высокой комфортности, в высотных зданиях, в зданиях без машинного помещения. Исключение редуктора из механической части электропривода позволило улучшить его

массогабаритные показатели, упростить обслуживание электропривода, улучшить экологические показатели.

Учитывая все вышеизложенные требования, развитие получили только синхронные привода с постоянными магнитами и тихоходные асинхронные привода. Это связано с тем, что с использованием безредукторной лебедки для обеспечения необходимых скоростей перемещения кабины, двигатель должен иметь низкую номинальную частоту вращения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТИХОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛИФТОВОЙ ЛЕБЕДКИ

Чтобы математически описать электропривод лифтовой лебедки, необходимо описать его электрическую и механические части (рис.6).

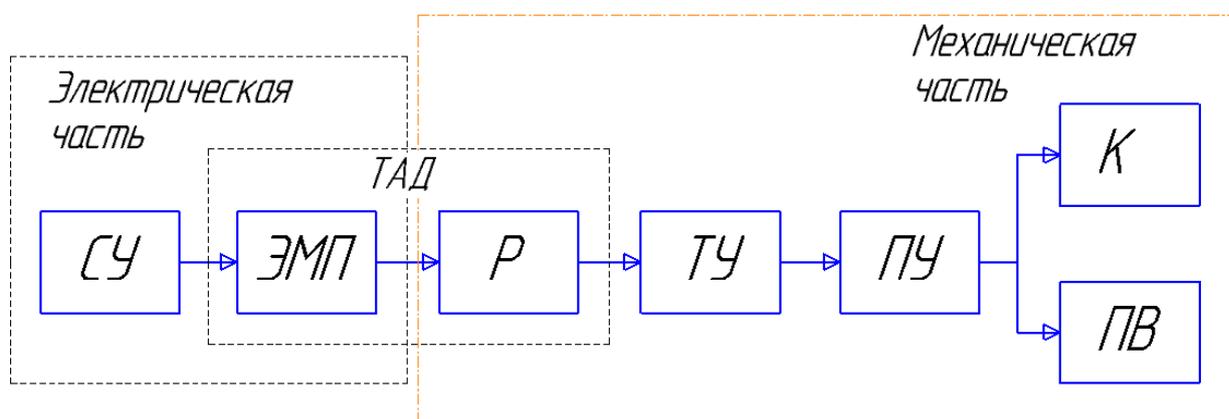


Рисунок 7 - Разделенная блок-схема безредукторного электропривода лифтовой лебедки

В электрическую часть входит: СУ – система управления (преобразователь частоты, сервоконтроллер, лифтовая станция); ЭМП – электромеханический преобразователь тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В механическую часть электропривода входит: Р – ротор тихоходного асинхронного двигателя; ТУ – тормозное устройство; ПУ – передаточное устройство (канатоведущий шкив, упругие связи); К – кабина лифта; ПВ – противовес.

2.1. Математическое описание тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Для составления уравнений математической модели АД, воспользуемся рядом стандартных допущений [12]:

- Параметры обмоток всех фаз - симметричны;

- Магнитное поле асинхронного двигателя имеет синусоидальное распределение вдоль воздушного зазора;
- Принимаем напряжение на ПЧ синусоидальной формы, заведомо не учитывая взаимного влияния между АД и ПЧ по силовому каналу;
- Потери в стали на вихревые токи и перемагничивание - не учитываются;
- Не учитывается насыщение магнитной цепи АД;
- эффект вытеснения токов в проводниках ротора пренебрежимо мал ввиду того, что частота токов ротора при питании от ПЧ ограничена рабочим участком механической характеристики.

В системе преобразователь частоты тихоходный асинхронный двигатель, на ТАД подается питающее напряжение пониженной частоты. Статор ТАД имеет большее количество витков, чем стандартный асинхронный двигатель. Фазное напряжение, подаваемое на ТАД преобразователем частоты, может быть высоким даже при небольшой частоте питающего напряжения. В этих условиях значительно проявляется насыщение магнитной цепи по пути следования основного магнитного потока в тихоходном асинхронном двигателе.

На основании этих допущений, используя второй закон Кирхгофа, уравнения для ЭДС в обмотках статора и ротора АД можно представить в следующем виде:

для цепей статора и ротора соответственно

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{array} \right.$$

В представленных системах уравнения приняты следующие обозначения:

$$R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_S \text{ – активные сопротивления фаз статора;}$$

$$R_{RA} = R_{RB} = R_{RC} = R_R \text{ – активные сопротивления фаз ротора;}$$

$$U_{SA} = U_{SB} = U_{SC} = U_{RA} = U_{RB} = U_{RC} \text{ – мгновенные фазные напряжения статора и ротора;}$$

$$I_{SA} = I_{SB} = I_{SC} = I_{RA} = I_{RB} = I_{RC} \text{ – мгновенные фазные токи статора и ротора;}$$

$$\Psi_{SA} = \Psi_{SB} = \Psi_{SC} = \Psi_{RA} = \Psi_{RB} = \Psi_{RC} \text{ – потокосцепления обмоток статора и ротора;}$$

Для связи между потокосцеплениями и токами в обмотках воспользуемся законом Ампера для статора и ротора соответственно:

$$\begin{cases} \Psi_{SA} = L_{SA} I_{SA} + L_{SASB} I_{SB} + L_{SASC} I_{SC} + L_{SARA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SARC} I_{RC} \\ \Psi_{SB} = L_{SBSA} I_{SA} + L_{SB} I_{SB} + L_{SBSB} I_{SB} + L_{SBSB} I_{SB} + L_{SBSC} I_{SC} + L_{SBRA} I_{RA} + L_{SBRB} I_{RB} + L_{SBRC} I_{RC} \\ \Psi_{SC} = L_{SCSA} I_{SA} + L_{SCSB} I_{SB} + L_{SC} I_{SC} + L_{SCRA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SCRC} I_{RC} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_{RA} = L_{RASA} I_{SA} + L_{RASB} I_{SB} + L_{RASC} I_{SC} + L_{RA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RARC} I_{RC} \\ \Psi_{RB} = L_{RBSA} I_{SA} + L_{RBSB} I_{SB} + L_{RBSC} I_{SC} + L_{RBRA} I_{RA} + L_{RB} I_{RB} + L_{RBRC} I_{RC} \\ \Psi_{RC} = L_{RCSA} I_{SA} + L_{RCSB} I_{SB} + L_{RCSC} I_{SC} + L_{RCRA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RC} I_{RC} \end{cases}$$

Уравнения потокосцепления показывают зависимость от токов в каждой обмотке через взаимную индукцию. В уравнениях, представленных выше, коэффициенты $L_{SA}, L_{SB}, L_{SC}, L_{RA}, L_{RB}, L_{RC}$ являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – индуктивности между соответствующими обмотками.

Электромагнитный момент представим в следующем виде:

$$M = \frac{z_p}{\sqrt{3}} = [I_{RA} (\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB} (\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC} (\Psi_{RA} - \Psi_{RB})],$$

где z_p это число пар полюсов рассматриваемого АД.

На основании второго закона Ньютона представим уравнение для движения и равновесия моментов на валу АД:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{\text{нагр}},$$

где J – момент инерции на валу АД, ω_r – угловая частота вращения ротора, M – момент развиваемый АД, $M_{\text{нагр}}$ – момент, приложенный к валу двигателя со стороны нагрузки.

Анализируя режимы работы АД в составе нагрузочного моментного ЭП и совокупность допущений, принятых выше можно предположить правомерность использования для математического описания эквивалентной двухфазной модели.

На пути упрощения математического описания АД оказался подходящим метод пространственного вектора, позволяющий существенно упростить и сократить вышеприведённую систему уравнений; метод позволяет связать уравнения, представленные выше, в единую систему с векторными переменными состояния. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трёхфазных переменных состояния (напряжение, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором.

Представим систему уравнений с векторными переменными состояния для случая с произвольной ориентацией системы координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{sx} I_{sy} + \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J = \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{\text{нагр}} \end{array} \right.$$

Здесь $U_s, U_r, I_s, I_r, \Psi_s$ и Ψ_r – двухэлементные векторы напряжений, токов и потокосцеплений, представленные в двухфазной системе координат с произвольной ориентацией в виде составляющих по координатным осям. Переменная ω_k служит для задания произвольной частоты вращения координатной системы. j – матричная константа, служит для переворота компонентов векторных переменных и позволяет упростить системы уравнений.

Но в данной системе уравнений слишком много неизвестных переменных, поэтому исключим переменные L_r и Ψ_s :

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_s - L_m \cdot \bar{I}_s}{L_m}, \quad \bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - L_m \cdot \bar{I}_s}{L_r}.$$

Следовательно,

$$\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{I}_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot (\bar{\Psi}_s - L_m \cdot \bar{I}_s), \text{ из этого уравнения выразим } \bar{\Psi}_s :$$

$$\bar{\Psi}_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r + \left(L_s + \frac{L_m}{L_r} \right) \cdot \bar{I}_s.$$

$$\begin{aligned} U_r &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega \bar{\Psi}_s = \\ &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left(L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right). \end{aligned}$$

В уравнение для напряжения ротора подставляем формулу для \bar{I}_r .

$$\begin{aligned} U_r &= R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \cdot \bar{\Psi}_r = \\ &= R_r \cdot \left(\frac{\bar{\Psi}_r - L_m \cdot \bar{I}_s}{L_r} \right) + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \cdot \bar{\Psi}_r = \\ &= \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{L_r} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{I}_s = \\ &= \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left[j(\omega_k - \omega_r z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right] \bar{\Psi}_r - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{I}_s. \end{aligned}$$

Из данного уравнения выражаем $\frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}$ и подставляем в предыдущее:

$$\begin{aligned} U_s &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{I}_s = \\ &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r - \frac{L_m}{L_r} \left(j(\omega_k - \omega_r z_p) - \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot \bar{I}_s + \\ &+ \left(L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left(L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \bar{I}_s. \end{aligned}$$

Упрощаем,

$$\begin{aligned} U_s &= \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r + \left(R_s + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{I}_s + \\ &+ \frac{L_m}{L_r} \cdot \left(j\omega_k \cdot z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \bar{\Psi}_r - \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt}. \\ &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r - \frac{L_m}{L_r} \left(j(\omega_k - \omega_r z_p) - \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot \\ &+ \left(L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left(L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \bar{I}_s. \end{aligned}$$

Составляем систему уравнений, комбинируя полученные уравнения. С учетом, что для тихоходного асинхронного двигателя с КЗ ротором $U_r = 0$.

Тогда полученные уравнения будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} U_s = \left(R_s + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \left(j\omega_k \cdot z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \bar{\Psi}_r - \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left(j(\omega_k - \omega_r z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{I}_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нагр}) \end{cases}$$

Введем классические вспомогательные коэффициенты, чтобы упростить запись системы уравнений:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad L_\sigma = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad R_\sigma = R_s + R_r \cdot K_r^2, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r}.$$

К тому же необходимо учесть изменение $L_m = f(I_m)$:

$$K_r(I_m) = \frac{L_m(I_m)}{L_r(I_m)};$$

$$L_3(I_m) = L_s(I_m) - \frac{L_m^2(I_m)}{L_r(I_m)};$$

$$R_3(I_m) = R_s + R_r \cdot K_r^2(I_m);$$

$$A_r(I_m) = \frac{R_r}{L_r(I_m)}.$$

Учет насыщения магнитной цепи реализуется перерасчетом вспомогательных коэффициентов.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_3(I_m) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k L_3(I_m) I_s + K_r(I_m) \cdot (j\omega_k \cdot z_p - A_r(I_m)) \cdot \bar{\Psi}_r - L_3(I_m) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} - R_r \cdot K_r(I_m) \cdot \bar{I}_s + A_r(I_m) - j\omega_k \bar{\Psi}_r - \omega_r z_p \bar{\Psi}_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нарп}) \end{array} \right.$$

Выразим произвольные вектора токов и потокосцепления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{I}_s}{dt} = \frac{1}{L_3(I_m)} \cdot (U_s - R_3(I_m) \cdot \bar{I}_s + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \bar{\Psi}_r - K_r(I_m) \cdot j\omega_r \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_r) - j\omega_k \bar{I}_s \cdot \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot \bar{I}_s - A_r(I_m) \cdot \bar{\Psi}_r - j\omega_k \bar{\Psi}_r + \omega_r j \cdot z_p \bar{\Psi}_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нарп}) \end{array} \right.$$

Теперь представим данную систему в скалярном виде. Для этого заменим вектора $\bar{\Psi}_r$ и \bar{I}_s на их составляющие по координатам x и y .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_{\vartheta}(I_m)} \cdot (U_{sx} - R_{\vartheta}(I_m) \cdot dI_{sx} + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \Psi_{rx} - K_r(I_m) \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \Psi_{ry}) + \omega_k \cdot I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} = \frac{1}{L_{\vartheta}(I_m)} \cdot (U_{sy} - R_{\vartheta}(I_m) \cdot dI_{sy} + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \Psi_{ry} - K_r(I_m) \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \Psi_{rx}) - \omega_k \cdot I_{sx} \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot I_{sx} - A_r(I_m) \cdot \Psi_{rx} - \omega_k \Psi_{ry} - \omega_r \cdot z_p \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot I_{sy} - A_r(I_m) \cdot \Psi_{ry} - \omega_k \Psi_{rx} - \omega_r \cdot z_p \Psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\Psi_{rx} \cdot I_{sy} - \Psi_{ry} \cdot I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нарп}) \end{array} \right.$$

На этом описание процессов ТАД с помощью дифференциальных уравнений можно считать законченным. Данное математическое описание ТАД можно использовать для создания его имитационной модели.

2.2. Математическое описание механической части

В качестве математического описания механической части безредукторной лифтовой лебедки использована трехмассовая механическая система.

Динамические явления в подъемных механизмах возможно изучать, используя упрощенные расчетные схемы с меньшим числом степеней свободы. Эти схемы имитируют работу машины, как движение абсолютно жестких точечных масс, соединенных упругими невесомыми связями, под воздействием внешних нагрузок. Особенностью данной расчетной схемы для описания работы лифтового механизма являются канаты, которые представляют собой упругие связи, работающие на растяжение, и массы грузов, которые обладают статической нагрузкой, направленной вниз, вне зависимости от направления движения системы.

Чем больше параметров будет учтено в математической модели, тем большей будет точность результата расчета. Но при этом, математическое описание может быть сильно усложнено. Поэтому наибольшее

распространение получили двухмассовые и трехмассовые расчетные схемы. С их помощью можно получить переходные процессы, удовлетворяющие требуемым условиям практического использования. [20]

Допущения:

- Механическая часть являет собой абсолютно жесткие массы, характеризующиеся сосредоточенными моментами инерции;
- Сосредоточенные массы механической части лебедки связаны друг с другом упругими связями;
- Деформация упругой связи – нелинейна, но подчиняется закону Гука;
- Гашение колебаний механической части осуществляется силами внутреннего вязкого трения в материале упругих связей при их деформации, пропорциональных разности скоростей сосредоточенных масс, расположенных по обе стороны от соответствующей упругой связи.

Параметры кинематической схемы механической части сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Параметры кинематической схемы

Обозначение	Величина/ед.изм.	Описание
γ_c	$7,8 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$	Плотность стали
$J_{\text{ТАД}}$	$0,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Момент инерции ТАД
$D_{\text{КВШ}}$	$0,32 \text{ м}$	Диаметр канатоведущего шкива
$L_{\text{КВШ}}$	$0,06 \text{ м}$	Толщина канатоведущего шкива
$D_{\text{Т}}$	$0,35 \text{ м}$	Диаметр тормозного диска
$L_{\text{Т}}$	$0,01 \text{ м}$	Толщина тормозного диска
L_2	$0,8 \text{ м}$	Расстояние между канатоведущим шкивом и отводящей опорой

Продолжение таблицы 2.

$E_{тр}$	$1,25 \cdot 10^{12} \text{ Н/м}^2$	Модуль продольной упругости для стальных тросов
$L_{тр}$	40 м	Длина тросов
$L_{трк}$	1,3...40 м	Длина тросов со стороны кабины
$L_{трпрот}$	40....1 м	Длина тросов со стороны противовеса
$d_{тр}$	$8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	Диаметр одного троса
$N_{тр}$	3	Количество параллельно соединенных тросов
k_3	0,5	Коэффициент заполнения сечения тросов
$m_{п}$	400 кг	Максимальная грузоподъемность
$m_{к}$	800 кг	Масса кабины
$m_{прот}$	1000 кг	Масса противовеса
$\rho = \frac{D_{квш}}{2}$	0,16 м	Радиус приведения
$\lambda_{вт}$	0,15	Логарифмический декремент затухания механических колебаний под действием внутренних сил вязкого трения

Составляем систему, описывающую трехмассовую систему электропривода с безредукторной лифтовой лебедкой (рис.8):

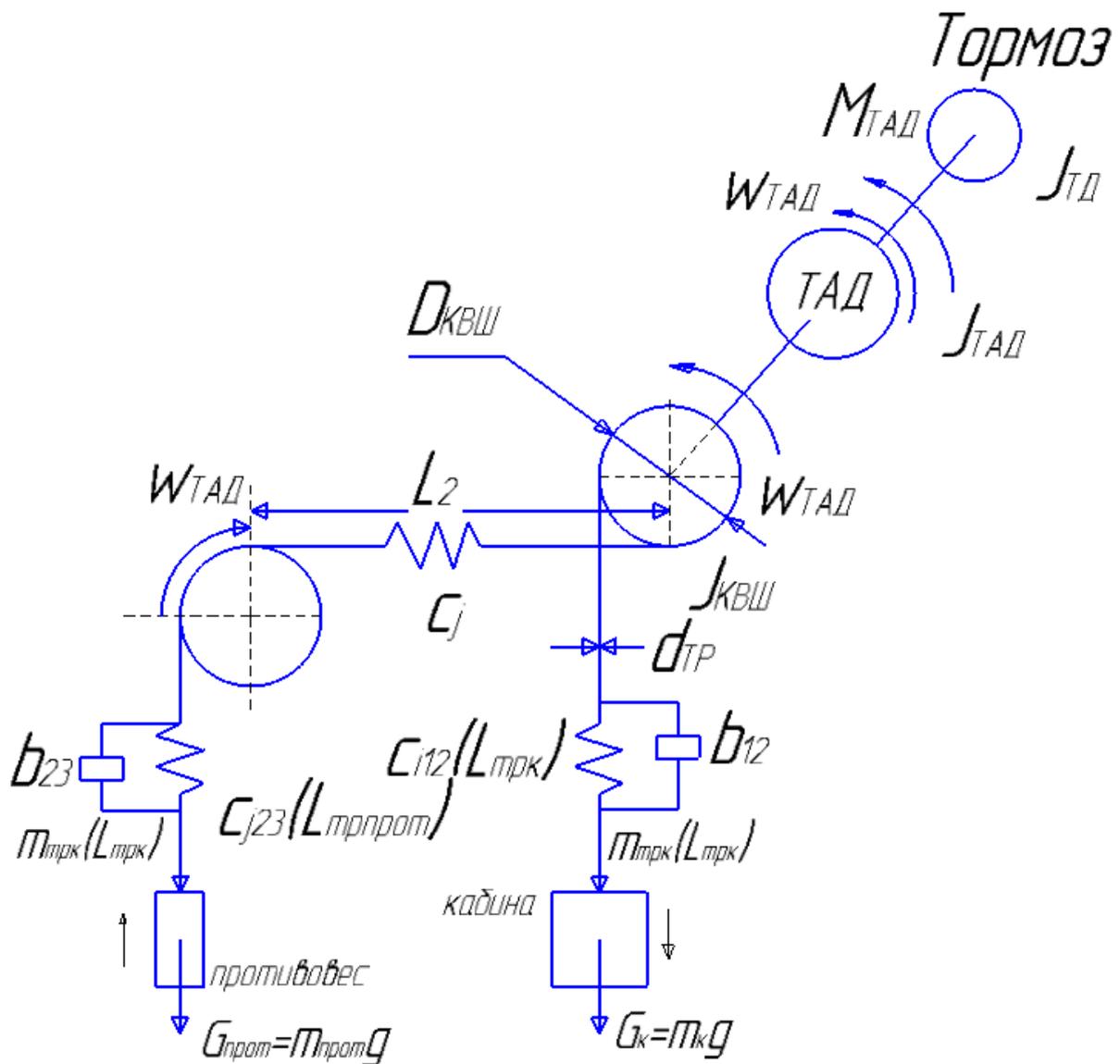


Рисунок 8 – Кинематическая схема безредукторной лифтовой лебедки
 Сосредоточенные массы, упругости и нелинейные зависимости позволяют представить безредукторную лебедку как колебательную систему с нелинейностями.

Эквивалентный момент электропривода будет равен:

$$J_{\text{ЭК}} = J_{\text{ТАД}} + J_{\text{ТД}} + J_{\text{КВШ}},$$

где $J_{\text{ТАД}}$ – момент инерции ТАД;

$J_{\text{ТД}}$ – момент инерции тормозного диска;

$J_{\text{КВШ}}$ – момент инерции канатоведущего шкива.

Момент инерции тормозного диска можно определить из выражения:

$$J_{\text{ТД}} = \gamma_{\text{С}} \cdot \frac{\pi}{32} \cdot D_{\text{Т}}^4 \cdot L_{\text{ТД}} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot 0,35^4 \cdot 0,01 = 0,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $\gamma_{\text{С}}$ – плотность стали;

$D_{\text{Т}}^4$ – диаметр тормозного диска;

$L_{\text{ТД}}$ – толщина тормозного диска.

Следовательно, момент инерции канатоведущего шкива:

$$J_{\text{КВШ}} = \gamma_{\text{С}} \cdot \frac{\pi}{32} \cdot D_{\text{КВШ}}^4 \cdot L_{\text{КВШ}} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot 0,32^4 \cdot 0,06 = 0,482 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $\gamma_{\text{С}}$ – плотность стали;

$D_{\text{КВШ}}^4$ – диаметр канатоведущего шкива;

$L_{\text{КВШ}}$ – канатоведущего шкива.

Подставляем полученные результаты в исходную формулу эквивалентного момента инерции электропривода:

$$J_{\text{ЭК}} = J_{\text{ТАД}} + J_{\text{ТД}} + J_{\text{КВШ}} = 0,07 + 0,115 + 0,482 = 0,667 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Линейная жесткость тросов кабины имеет переменный характер в зависимости от изменения длины тросов $\Delta L_{\text{тр}}$ во время работы лифта.

Зависимость линейной жесткости троса при растяжении можем определить по следующему выражению:

$$c_j(L_{\text{тр}}) = \frac{E_{\text{тр}} \cdot S_{\text{тр}}}{L_{\text{тр}}},$$

где $E_{\text{тр}}$ – модуль продольной упругости для стальных тросов;

$S_{\text{тр}}$ – площадь сечения проволок троса м^2 ;

$L_{\text{тр}}$ – длина троса.

Чтобы определить площади сечения кабелей троса, воспользуемся следующим выражением:

$$S_{\text{тр}} = k_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} \cdot N_{\text{тр}} = 0,5 \cdot \frac{3,14 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 3 = 9,425 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \text{ где}$$

$d_{\text{тр}}^2$ – диаметр троса;

k_3 – коэффициент заполнения сечения тросов;

$N_{\text{тр}}$ – количество параллельно соединенных тросов.

На рисунке 9 построены зависимости линейной жесткости от длины троса $c_j = f(L_{тр})$.

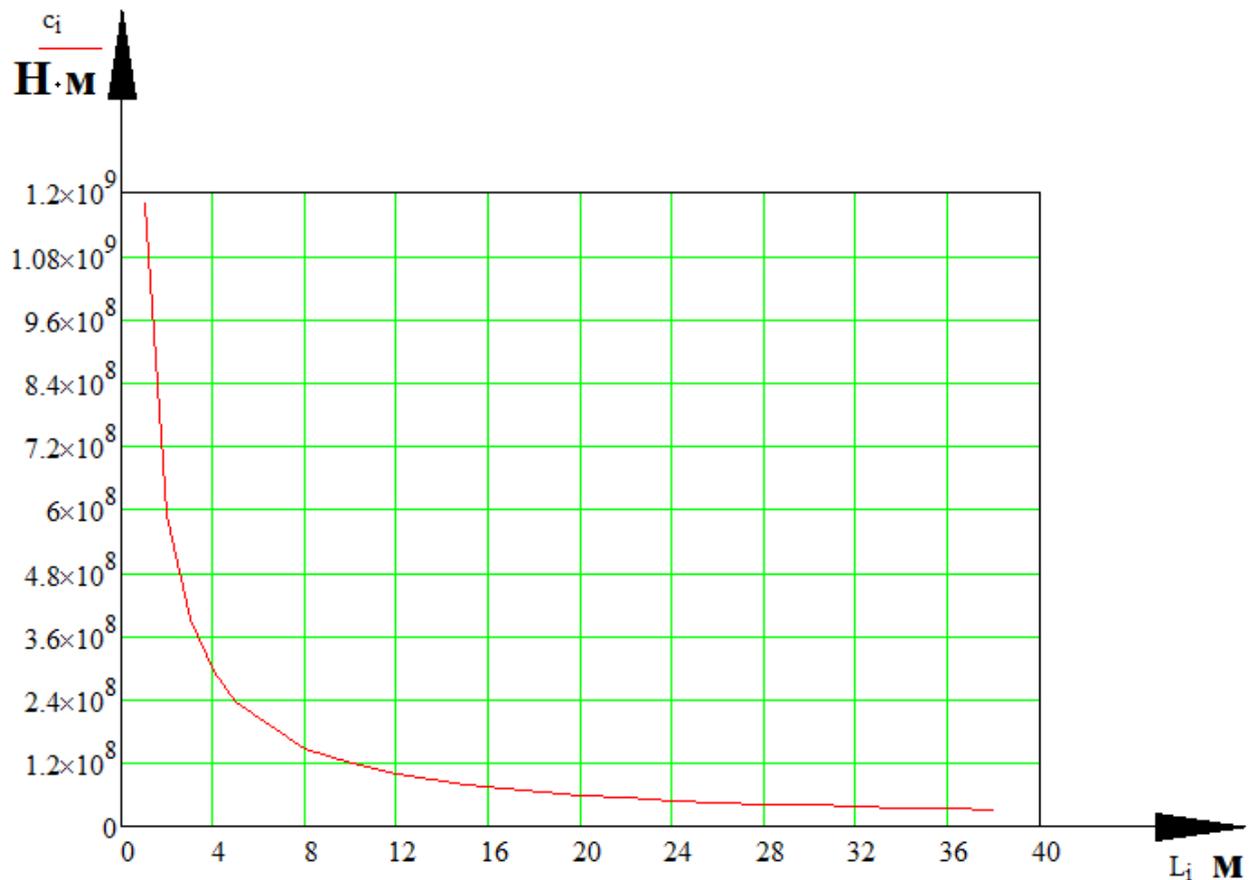


Рисунок 9 - Линейная зависимость жесткости троса от его длины

$$c_j = f(L_{тр}) .$$

Чтобы упростить кинематическую схему механической части, внесем допущение, приняв часть троса длиной L_2 за абсолютно жесткое звено. Тогда упрощенная кинематическая схема будет выглядеть следующим образом (рис.10). [34]

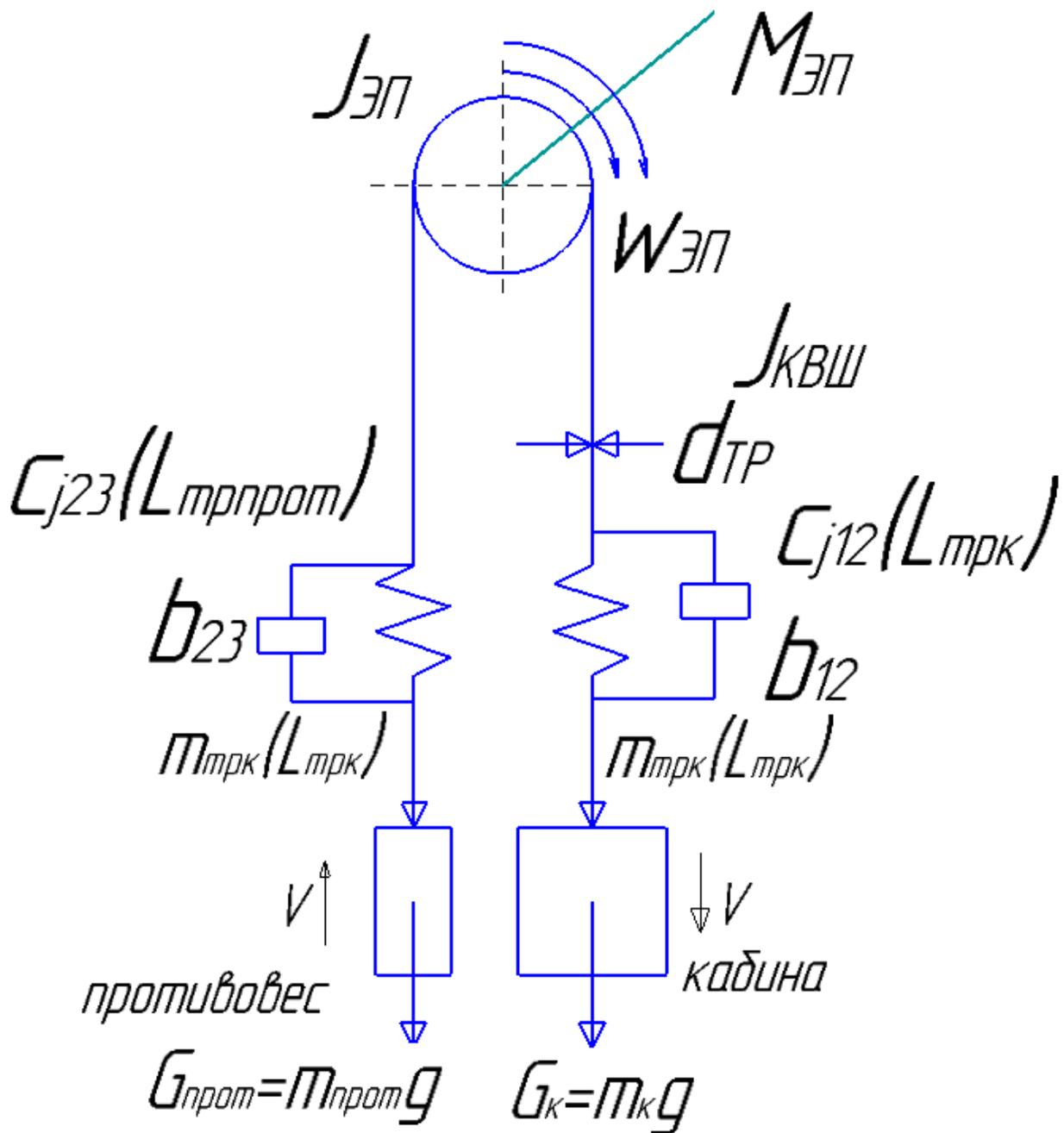


Рисунок 10 – Упрощенная кинематическая схема безредукторной лебедки

Далее необходимо провести учет изменения массы тросов $\Delta m_{\text{трк}}$, вследствие изменения их длины во время эксплуатации лифтовой лебедки:

$$m_{\text{трк}}(L_{\text{ТРК}}) = 0,349 \cdot N_{\text{ТР}} \cdot L_{\text{ТРК}},$$

где $L_{\text{ТРК}}$ – длина тросов со стороны кабины;

$N_{\text{ТР}}$ – количество параллельно соединенных тросов.

Масса троса со стороны противовеса:

$$m_{\text{трпрот}}(L_{\text{трпрот}}) = 0,349 \cdot N_{\text{тр}} \cdot L_{\text{трпрот}},$$

где $L_{\text{трпрот}}$ – длина тросов со стороны противовеса.

Учитывая вышеприведенные изменения масс тросов, определим приведенные моменты инерций кабины и противовеса.

Для кабины:

$$J_{\text{К}}(L_{\text{ТРК}}) = (m_{\text{Г}} - m_{\text{К}} - m_{\text{ТРК}}(L_{\text{ТРК}})) \cdot \rho^2,$$

где $m_{\text{Г}}$ – масса груза, т.е. масса людей в кабине;

$m_{\text{К}}$ – масса кабины;

$m_{\text{ТРК}}$ – масса троса со стороны в кабины;

ρ – радиус приведения.

Для противовеса:

$$J_{\text{ПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}}) = (m_{\text{ПРОТ}} + m_{\text{ТРПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}})) \cdot \rho^2,$$

где $m_{\text{Г}}$ – масса противовеса;

$m_{\text{ТРК}}$ – масса троса со стороны в противовеса;

ρ – радиус приведения.

Резонансные частоты колебаний полученной трехмассовой системы безредукторной лебедки, состоящей из моментов инерций электропривода, кабины и противовеса, можно определить следующим образом:

$$\omega_{12,23} = \sqrt{\frac{\omega_{01}^2 \cdot \gamma_1 + \omega_{03}^2 \cdot \gamma_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_{01}^2 \gamma_1 + \omega_{03}^2 \cdot \gamma_2}{2}\right)^2 - \gamma_2 \cdot \omega_{01}^2 \cdot \omega_{03}^2}},$$

$$\text{где } \omega_{01}^2 = \frac{c_{\varphi 12}}{J_1} = \frac{c_{\varphi 12} \cdot \rho^2}{J_{\text{К}}}, \omega_{03}^2 = \frac{c_{\varphi 23}}{J_3} = \frac{c_{\varphi 22} \cdot \rho^2}{J_{\text{прот}}},$$

$$\gamma_1 = \frac{J_1 + J_2}{J_2} = \frac{J_{\text{К}}(L_{\text{ТРК}}) + J_{\text{прк}}}{J_{\text{ЭП}}}, \gamma_2 = \frac{J_2 + J_3}{J_2} = \frac{J_{\text{ЭП}} + J_{\text{прот}}(L_{\text{ТРПРОТ}})}{J_{\text{ЭП}}},$$

$$\gamma_3 = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_2} = \frac{J_{\text{К}}(L_{\text{ТРК}}) + J_{\text{ЭП}} + J_{\text{ПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}})}{J_{\text{ЭП}}}.$$

Коэффициенты демпфирования можно рассчитать по формуле:

$$b = \frac{\lambda_{\text{ВТ}} \cdot c_{\varphi}}{\pi \cdot \omega} = \frac{\lambda_{\text{ВТ}} \cdot c_{\varphi} \cdot \rho^2}{\pi \cdot \omega},$$

где $\lambda_{\text{ВТ}}$ – логарифмический декремент затухания колебаний под действием внутренних сил вязкого трения.

Следовательно, расчетную трехмассовую систему можно описать следующими дифференциальными уравнениями. Данные уравнения можно использовать для исследования динамики электропривода безредукторной лифтовой лебедки.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{ЭП}} \cdot \frac{d\omega_{\text{ЭП}}}{dt} = M_{\text{ЭП}} - M_{12} + M_{23} - M_{\text{ТР}} \\ J_{\text{К}}(L_{\text{ТРК}}) \frac{d\omega_{\text{К}}}{dt} = M_{12} - M_{\text{К}} \\ J_{\text{ПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}}) \frac{d\omega_{\text{ПРОТ}}}{dt} = M_{23} - M_{\text{ПРОТ}} \\ M_{12}(L_{\text{ТРК}}) = c_{\varphi 12}(L_{\text{ТРК}}) \cdot (\varphi_{\text{ЭП}} - \varphi_{\text{К}}) + b_{12} \cdot (\omega_{\text{ЭП}} - \omega_{\text{К}}) \\ M_{23}(L_{\text{ТРПРОТ}}) = c_{\varphi 23}(L_{\text{ТРПРОТ}}) \cdot (\varphi_{\text{ЭП}} - \varphi_{\text{ПРОТ}}) + b_{23} \cdot (\omega_{\text{ЭП}} - \omega_{\text{ПРОТ}}) \\ M_{\text{ТР}} = M \cdot \text{sign}(\omega_{\text{ЭП}}) \end{array} \right.$$

где $J_{\text{ЭП}}, J_{\text{К}}, J_{\text{ПРОТ}}$ – моменты инерций электропривода, кабины и противовеса;
 $M_{\text{ЭП}}, M_{12}, M_{23}$ – момент электропривода и суммарные моменты, передаваемые через упругие связи;

$c_{\varphi 12}, c_{\varphi 23}$ – коэффициенты жесткости;

b_{12}, b_{23} – коэффициенты внутреннего демпфирования;

$\text{sign}(\omega_{\text{ЭП}})$ – функция, учитывающая реактивный характер момента трения $M_{\text{ТР}}$:

$\text{sign}(\omega_{\text{ЭП}}) = 1$ при $(\omega_{\text{ЭП}} \geq 0)$ и $\text{sign}(\omega_{\text{ЭП}}) = -1$ при $(\omega_{\text{ЭП}} \leq 0)$

M – величина момента трения, $M = \text{const}$.

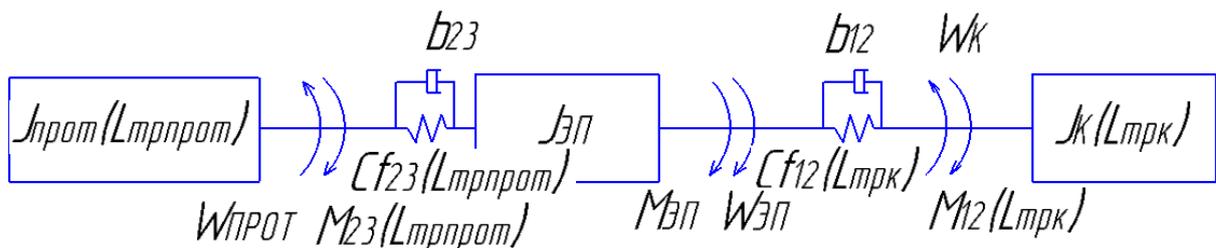


Рисунок 11- Расчётная схема трехмассовой системы электропривода

Отличие от классического представления трехмассовой системы в том, что задающий момент прикладывается к звену с моментом инерции $J_{\text{ЭП}}$, а звенья $J_{\text{ПРОТ}}$ и $J_{\text{К}}$ будут перемещаться в противоположных направлениях.

Для анализа переходных процессов и создания имитационной модели механической части безредукторной лебедки пассажирского лифта, на основе выше описанных уравнений, составим структурную схему трехмассовой механической системы (рис.12).

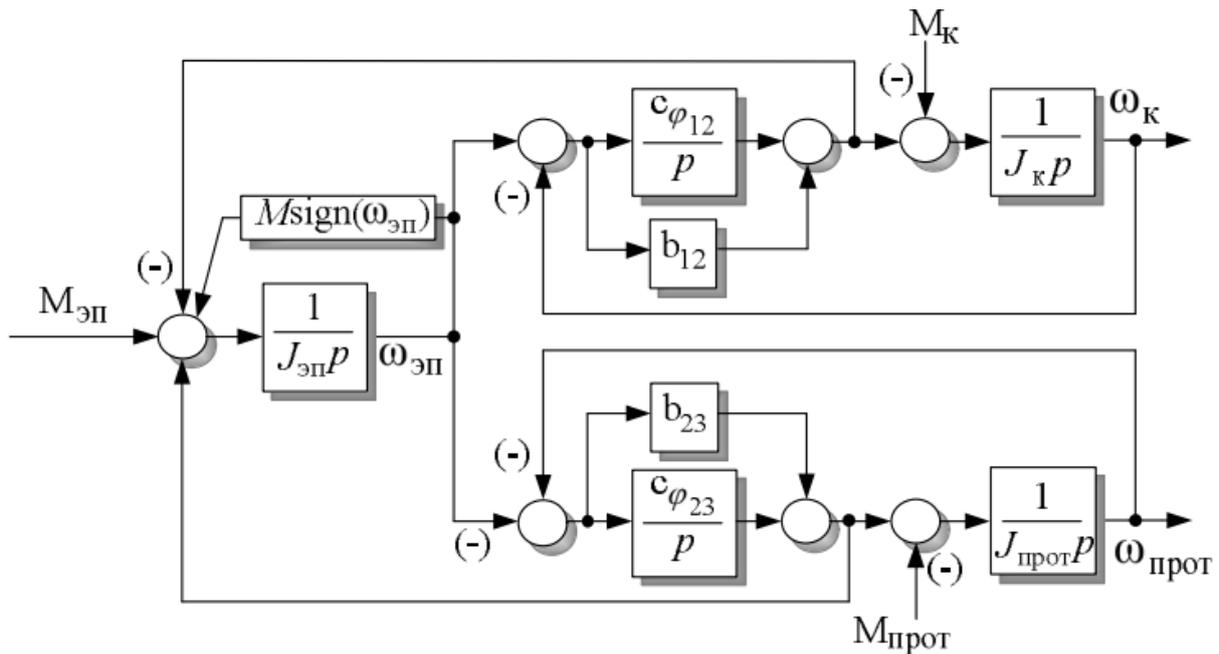


Рисунок 12 - Структурная схема трехмассовой механической части безредукторной лифтовой лебедки

3. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Расчет мощности двигателя и его выбор

Технические параметры проектируемого лифта приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Заданные параметры лифта

Грузоподъемность, G	Вес кабины, G ₀	Вес противовеса	Скорость подъема, V	КПД лифта, η	ПВ
400 кг	800 кг	1000 кг	1 м/с	0,8	60%

Рассчитаем мощность при подъеме:

$$P_{\text{под}} = \frac{G + G_0 - G_{\text{пр}}}{102 \cdot \eta} = \frac{800 + 400 - 1000}{102 \cdot 0.8} = 2,451 \text{ кВт}$$

Как было сказано ранее, использование общепромышленного двигателя в безредукторной лифтовой лебедке нецелесообразно. Поэтому нам необходимо выбрать тихоходный асинхронный двигатель.

К сожалению, серийное производство тихоходных двигателей до сих пор массово не налажено, их производство ведется по индивидуальному заказу специализированной серии.

Существует множество методик для разработки тихоходного двигателя из типовых АД общепромышленных серий с числами полюсов $2p=6-12$.

В таблице 4 приведен ряд существующих вариантов разработанных тихоходных двигателей подходящей мощности [33].

Таблица 4 – Тихоходные асинхронные двигатели

ТИП	P _{ном} , кВт	КПД, %	Сos φ	I _{ном} , А	M _{макс} / M _{ном}
5AF200M8	2,41	47,1	0,87	10	1,23
ЧРАД200L8	2,5	50,2	0,85	9,6	1,38
5AF225M8	2,6	55,6	0,756	5,1	1,36

Выбираем двигатель 5AF225M8, так как он имеет наименьший номинальный ток питания статорной обмотки. Меньшее значение тока позволит существенно сэкономить на стоимости преобразователя частоты и на энергопотреблении в целом.

Таблица 5. Паспортные данные двигателя 5AF225M8:

Паспортные данные		Параметры схемы замещения	
$P_{НОМ} = 2600 \text{ Вт}$	Мощность	$R_s = 8,15 \text{ Ом}$	Активное сопротивление статора
$U_{НОМ} = 323 \text{ В}$	Фазное напряжение	$L_s = 0,261 \text{ Гн}$	Индуктивность статора
$I_{НОМ} = 5,1 \text{ А}$	Фазный ток	$R_r = 3,9 \text{ Ом}$	Активное сопротивление ротора
$n_{НОМ} = 51 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	Номинальная частота вращения	$L_r = 0,285 \text{ Гн}$	Индуктивность ротора
$\cos \varphi_{НОМ} = 0,756 \text{ о.е.}$	Коэффициент мощности	$L_m = 0,19 \text{ Гн}$	Индуктивность цепи намагничивания
$\eta_{НОМ} = 55,6\%$	КПД	$J = 0,07 \text{ кг} / \text{м}^2$	Момент инерции двигателя
$f_{НОМ} = 4 \text{ Гц}$	Номинальная частота	$R_s = 8,15 \text{ Ом}$	

3.1.1. Построение механических и электромеханических характеристик

Используя данные с таблицы 5, построим механическую и электромеханические характеристики выбранного двигателя.

Расчет механической характеристики выполним согласно с выражением [31]:

$$M(\omega) = \frac{m \cdot U_s^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \left[(X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]}$$

где

m – число фаз статора;

U_s^2 – фазное напряжение обмотки статора;

$\omega_0 = \frac{2\pi f}{z_p}$ – синхронная угловая скорость;

s – скольжение;

$R_1, R_2', X_{s\sigma}, X_{r\sigma}$ – Активные и индуктивные сопротивления обмотки статора.

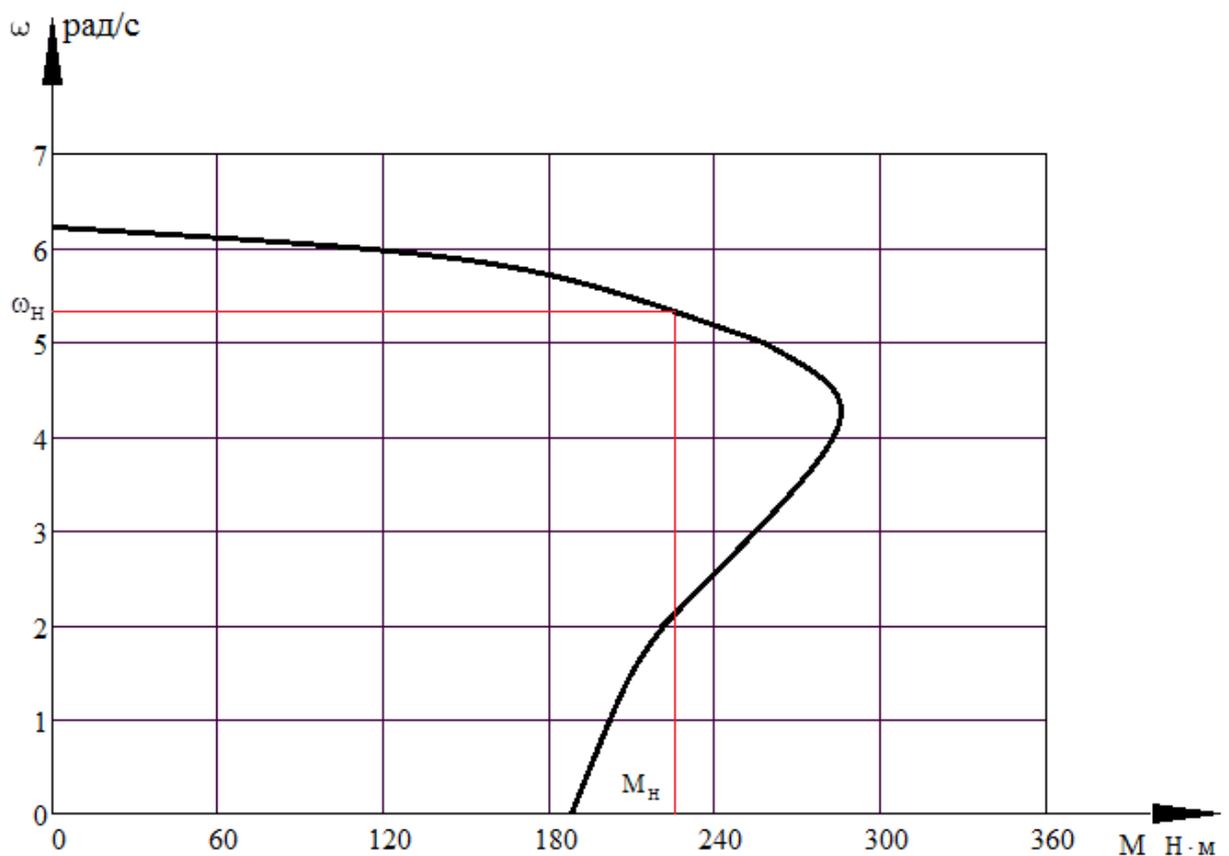


Рисунок 13- Механическая характеристика ТАД при номинальном режиме работы

Электромеханическую характеристику рассчитаем по формуле:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_m^2 + I_r'^2 + 2 \cdot I_m \cdot I_r' \cdot \sin[\varphi_2]}$$

Где

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_m^2 + I_r'^2 + 2 \cdot I_m \cdot I_r' \cdot \sin[\varphi_2]},$$

I_m – ток намагничения;

I_r' – ток ротора, приведенный к обмотке статора.



Рисунок 14 - Электромеханическая характеристика ТАД в номинальном режиме работы

3.2. Выбор преобразователя частоты

В настоящее время развитие лифтостроения обширно не использует технологию с использованием тихоходного асинхронного двигателя для лифтовых безредукторных лебедок, следовательно, специализированного преобразователя частоты для тихоходного асинхронного двигателя не существует в серийном производстве. Поэтому, чтобы выбрать подходящий преобразователь частоты для управления безредукторным электроприводом

лифтовой лебедки, необходимо учесть требования, предъявляемые к лифтовым преобразователям частоты, которые описаны в разделе 1.9.

Выбираем преобразователь частоты местного производителя компании ЭЛЕСИ ESD-TCL [19] (рис.15), его основные характеристики сведены в таблицу 6.

Серия преобразователей частоты (ПЧ) ESD-TCL оптимизирована для применения в составе главного привода грузопассажирских лифтов жилых и административных зданий, и предназначена для управления скоростью вращения и крутящим моментом электродвигателей (ЭД) переменного тока.

Таблица 6 – Технические характеристики ESD-TCL

Параметры	Характеристики
Функции управления	
Скалярный в разомкнутой системе	диапазон регулирования скорости 1:10
Скалярный с обратной связью по скорости	диапазон регулирования скорости 1:40
Векторный в разомкнутой системе	диапазон регулирования скорости 1:20
Векторный с обратной связью по скорости	диапазон регулирования скорости 1:1000
Диапазон изменения частоты выходного напряжения, Гц	0...320 (шаг 0,1 Гц)
Стабилизация момента электродвигателя, %	±5
пусковой момент, % от номинального значения, не менее	200

Ток срабатывания защиты при коротком замыкании, % от номинального значения	200
Электрические параметры	
Мощность управляемого электродвигателя, кВт	До 3,7 кВт
<p>Перегрузочная способность:</p> <ul style="list-style-type: none"> • при токе 150-200 % от номинального значения, с • при токе 120-150 % от номинального значения, с 	<p>60</p> <p>180</p>
Напряжение питающей сети, В	380
Частота питающей сети, Гц	50 ± 2
<p>Встроенный источник питания дискретного интерфейса внешних устройств:</p> <ul style="list-style-type: none"> • напряжение питания, В • ток нагрузки, мА 	<p>24</p> <p>300</p>

Таблица 7 - Параметры сигналов ввода-вывода

<p>Многоцелевые входные дискретные каналы управления.</p> <p>Напряжение, В</p> <p>Количество каналов, шт.</p>	<p>Настраиваемая логика Р или N</p> <p>24</p> <p>8</p>
<p>Многоцелевые выходные дискретные каналы управления, тип «Открытый коллектор»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • напряжением постоянного тока, В • постоянным током, мА <p>Количество каналов, шт.</p>	<p>24</p> <p>150</p> <p>2</p>
<p>Релейный выход:</p> <ul style="list-style-type: none"> • переменное напряжение, В, не более • переменным током, А, не более • постоянное напряжение, В, не более 	<p>250</p> <p>2</p> <p>30</p> <p>4</p>
<p>Диапазон измерения сопротивления датчика, кОм.</p>	<p>0,1...4</p>
<p>Дифференциальный импульсный вход:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напряжение, В • Ток, мА • Частота, кГц 	<p>подключение датчика скорости</p> <p>5</p> <p>100</p> <p>0-300</p>
<p>Интерфейсы связи</p>	<p>USB для связи с ПК; RS-485 (Modbus RTU, ProfiBus DP)</p>
<p>Максимальная скорость обмена</p>	<p>115 Кбит/с</p>

Таблица 8 - Условия эксплуатации

Степень защиты	IP20
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+50
Относительная влажность при температуре 35 °С, %, не более	95
Атмосферное давление, кПа	84...106,7

Таблица 9 - Параметры надежности

Срок службы, лет	
Время наработки на отказ, часов не менее	
Защитные функции: Ведение журнала событий; <ul style="list-style-type: none"> • Защита от обрыва фаз входных нагрузки • Защита от понижения / превышения напряжения • Защита от перегрева преобразователя частоты • Защита от перегрева электродвигателя (по датчику температуры) • Защита от перегрева тормозного резистора • Защита от перегрева тормозного резистора • Защита от КЗ м/у фазами / на землю • Контроль опрокидывания двигателя • Контроль потери задания скорости / связи по послед. Интерфейсу • Контроль работы вентилятора / датчика температуры 	Есть Есть Есть Есть Есть Есть Есть Есть Есть Есть



Рисунок 15 – Преобразователь частоты ESD-TCL-5,5

Особенности

- Возможность векторного управления асинхронным двигателем с датчиком скорости;
- Возможность увеличения пускового момента до 200% от номинального;
- Индикация режимов работы. Местное и дистанционное управление.
- Опциональный последовательный интерфейс RS-485 с протоколом ModBus RTU или ProfiBus DP.
- Функция оптимизации энергопотребления.
- Специальное программное обеспечение для управления лифтом.
- Задание плавной траектории разгона и остановки лифта для комфортного перемещения.
- Пропуск резонансных частот.
- Режим ускоренной настройки.

- Режим обучения на лифте.
- Встроенный тормозной ключ.
- Интерфейс инкрементного датчика скорости.
- USB-интерфейс для подключения к ПК.

Таким образом, выбранный преобразователь обладает всеми необходимыми параметрами для управления ТАД. Минусом является то, что данный преобразователь не специализирован для использования с тихоходным асинхронным двигателем, что сильно сказывается на его стоимости. Известно, что цена преобразователя частоты многократно увеличивается с увеличением мощности управляемого им электропривода. Это объясняется ценой на полупроводниковые элементы силовой электроники, которые являются основой преобразователя частоты.

Тихоходный асинхронный двигатель обладает низкой частотой напряжения (4-10 Гц), гораздо меньше промышленных 50 Гц. В обмотке статора протекают меньшие токи, а пусковой ток уменьшается примерно в 2 раза. Такие низкие номинальные данные двигателя позволили бы существенно сэкономить на элементах преобразователя частоты, что повлекло бы за собой уменьшение цены специализированные преобразователи частоты для тихоходных асинхронных двигателей.

3.3. Выбор безредукторной лифтовой лебедки

Чтобы выбрать безредукторную лебедку необходимо учесть требования, предъявляемые к безредукторным лебедкам, которые описаны в главе 1,7.

Идея использования безредукторной лифтовой лебедки не новая, но обычно для безредукторного привода применялся синхронный многополюсный двигатель с постоянными магнитами. [31]

Такой электропривод обладает своими недостатками:

- Высока стоимость лебедки;
- Низкий ресурс работы;
- Низкая совместимость с отечественными станциями управления;
- Низкая ремонтпригодность;
- Проблемы с утилизацией отработавших устройств.

Поэтому системы, использующие технологию ПЧ-ТАД, имеют высокую актуальность.

Преимущества безредукторного ЭП с ТАД:

- Более низкая стоимость;
- Совместимость с традиционной схемой установки отечественных лифтов;
- Совместимость с отечественными системами управления;
- Более высокая экологичность;
- Ремонтпригодность, простота оборудования;
- Сертификация для РФ, соответствие ПУБЭЛ.

Выбираем лебедку производства компании «РУСЭЛПРОМ» (рис.16), ее параметры занесены в таблицу 10.

Таблица 10. Технические параметры лебедки

$V_{ном},$ $м / с$	Грузоподъемность, кг	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об / мин	$M_{ном},$ $Н \cdot м$	$M_{max},$ $Н \cdot м$	$P_{эд},$ кВт	$I_{max},$ А
1	400	7,2	61	240	300	2,6	19



Рисунок 16 – Безредукторная лебедка «РУСЭЛПРОМ»

3.4. Выводы по разделу

Таким образом, в данном разделе было выбрано основное оборудование безредукторного электропривода лифта: тихоходный асинхронный двигатель, безредукторная лебедка и преобразователь частоты. Выбранное оборудование соответствует необходимым требованиям, предъявляемым к лифтовому оборудованию и безредукторному приводу в целом.

В процессе работы не осуществлялась практическая реализация, а проводились исследования на имитационной модели, поэтому в настоящей работе не приводится конкретный выбор датчиков и тормозного устройства в виду их большого разнообразия и различного исполнения. Выбор датчиков должен осуществляться согласно техническим данным, важно, чтобы выбранные устройства поддерживались на используемом оборудовании.

4. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРИВОДА ЛИФТА НА ОСНОВЕ ТИХОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

4.1. Система относительных единиц

Для создания имитационной модели тихоходного асинхронного двигателя воспользуемся системой относительных единиц. Диапазон значений относительных единиц гораздо меньше диапазона абсолютных величин. Таким образом, увеличим точность решения уравнений имитационной модели. [37]

Для расчета воспользуемся данными таблицы 5, представленной ранее.

Сначала примем значения базовых величин.

Максимальное номинальное фазное напряжение на обмотках статора:

$$U_{\sigma} = U_{ном} \cdot \sqrt{2} = 323 \cdot \sqrt{2} = 456,79;$$

Максимальное номинальное значение тока, протекающего в обмотках статора:

$$I_{\sigma} = I_{ном} \cdot \sqrt{2} = 5,1 \cdot \sqrt{2} = 7,212;$$

Номинальное значение частоты напряжения статора:

$$\omega_{\sigma} = 2 \cdot \pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 4 = 25,133;$$

$$\theta_{\sigma} = 1 \text{ (эл.рад)}.$$

Для производных базовых величин принимаем:

$$T_{\sigma} = \frac{\theta_{\sigma}}{\omega_{\sigma}} = \frac{1}{25,133} = 0,04 \text{ – время};$$

$$\Psi_{\sigma} = U_{\sigma} \cdot T_{\sigma} = 456,79 \cdot 0,04 = 18,175 \text{ – потокосцепление};$$

$$R_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{456,79}{7,212} = 63,33 \text{ – сопротивление};$$

$$L_{\sigma} = \frac{\Psi_{\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{18,175}{7,212} = 2,52 \text{ – индуктивность};$$

$$\Theta_{r\delta} = \frac{\theta_{\delta}}{z_p} = \frac{1}{4} = 0,25 - \text{угол поворота ротора,}$$

где $z_p = 4$ – число пар полюсов;

$$\omega_{r\delta} = \frac{\omega_{\delta}}{z_p} = \frac{25,133}{4} = 6,283;$$

$$k_m = \frac{1}{\cos \varphi_{s,ном} - \frac{3 \cdot I_{ном}^2 \cdot R_s}{3 \cdot U_{ном} \cdot I_{ном}}} = 1,594 - \text{вспомогательный коэффициент,}$$

$\cos \varphi_{s,ном}$ – значение коэффициента мощности в номинальном режиме;

$$P_{\delta} = \frac{m_f}{2 \cdot k_m} \cdot U_{ном} \cdot I_{ном} = \frac{3}{2 \cdot 1,594} \cdot 456,79 \cdot 7,212 = 3100 - \text{мощность;}$$

m_f –

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{r\delta}} = \frac{3100}{6,283} = 493,4 - \text{момент;}$$

$$W_{\delta} = P_{\delta} \cdot T_{\delta} = 3100 \cdot 0,4 = 123,35 - \text{энергия;}$$

$$J_{\delta} = \frac{W_{\delta}}{\omega_{\delta}^2} = \frac{123,35}{24,133} = 0,195 - \text{момент инерции.}$$

Используя выражения для производных базовых величин, рассчитаем параметры выбранного тихоходного асинхронного двигателя в относительных единицах:

$$r_s = \frac{R_s}{R_{\delta}} = \frac{8,15}{63,33} = 0,129 - \text{сопротивление статора;}$$

$$r_r = \frac{R_r}{R_{\delta}} = \frac{3,9}{63,33} = 0,062 - \text{сопротивление ротора;}$$

$$l_s = \frac{L_s}{L_{\delta}} = \frac{0,261}{2,52} = 0,104 - \text{индуктивность статора;}$$

$$l_r = \frac{L_r}{L_{\delta}} = \frac{0,285}{2,52} = 0,113 - \text{индуктивность ротора;}$$

$$l_m = \frac{L_m}{L_{\delta}} = \frac{0,19}{2,52} = 0,075 - \text{взаимная индуктивность;}$$

$$J_{o.e} = \frac{J}{J_{\delta}} = \frac{0,07}{0,195} = 0,358 - \text{момент инерции;}$$

Рассчитаем вспомогательные коэффициенты, с учетом $l_m = f(l_m)$:

$$k_r(i_m) = \frac{l_m(i_m)}{l_r(i_m)};$$

$$l_\sigma(i_m) = l_s(i_m) - \frac{l_m^2(i_m)}{l_r(i_m)};$$

$$r_\sigma(i_m) = r_s - r_r k_r^2(i_m);$$

$$a_r(i_m) = \frac{r_r}{l_r(i_m)}.$$

Рассмотренный вариант расчета параметров для создания имитационной модели асинхронного двигателя позволяет дать относительную оценку электрическим и механическим величинам при исследовании режимов работы тихоходного асинхронного двигателя на имитационной модели.

4.1.1. Имитация ТАД в неподвижной системе координат.

Для того, чтобы продолжить исследование безредукторного электропривода, необходимо убедиться в адекватности имитационной модели тихоходного асинхронного двигателя. Для этого создана его имитационная модель в неподвижной системе координат [12].

Для создания модели необходимо изменить полученную ранее математическую модель тихоходного асинхронного двигателя с учетом системы относительных единиц.

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{l_\sigma(i_m)} \cdot (u_{s\alpha} - r_\sigma(i_m) \cdot i_{s\alpha} + k_r(i_m) \cdot a_r(i_m) \cdot \psi_{r\alpha} - k_r(i_m) \cdot \omega_r \cdot \psi_{r\beta}) \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{l_\sigma(i_m)} \cdot (u_{s\beta} - r_\sigma(i_m) \cdot i_{s\beta} + k_r(i_m) \cdot a_r(i_m) \cdot \psi_{r\beta} - k_r(i_m) \cdot \omega_r \cdot \psi_{r\alpha}) \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = r_r \cdot k_r(i_m) \cdot i_{s\alpha} - a_r(i_m) \cdot \psi_{r\alpha} - \omega_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = r_r \cdot k_r(i_m) \cdot i_{s\beta} - a_r(i_m) \cdot \psi_{r\beta} - \omega_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ M = k_m (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нарп}) \end{cases}$$

Где переменные с индексами α и β соответствуют составляющим пространственного вектора в неподвижной системе координат. На основе данных уравнений разработана структурная схема ТАД, представленная на рисунке 17.

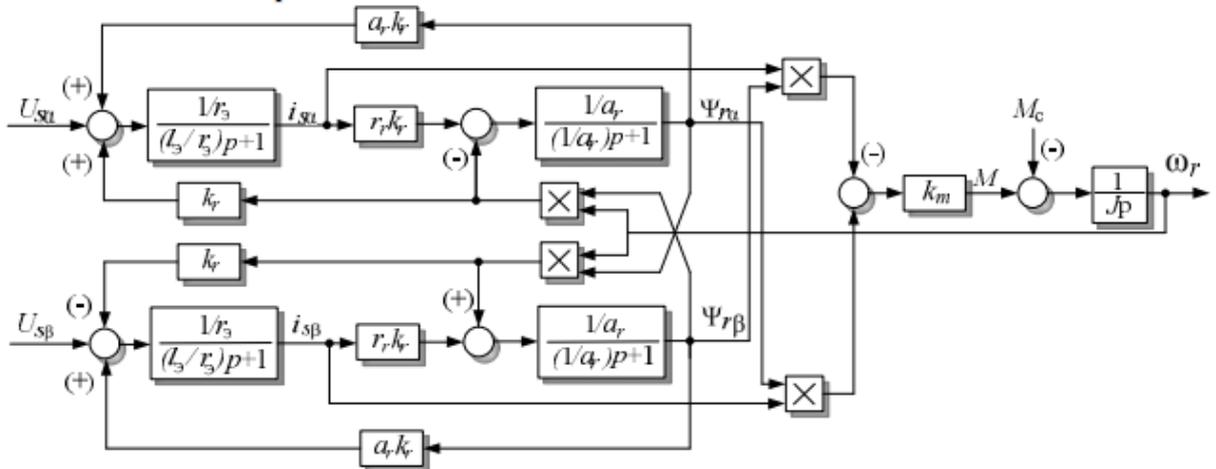


Рисунок 17 - Структурная схема тихоходного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

Реализуем данную структурную схему в прикладной программе Simulink Matlab 2014b (П1).

Произведем прямой пуск тихоходного асинхронного двигателя в условиях неуправляемого режима работы. Пуск выполнен без нагрузки, после выхода на номинальную скорость подаем нагрузку равную номинальному моменту. Результаты исследования имитационной модели ТАД в неподвижной системе координат представлены на рисунке 18.

Как видно из графиков, пуск двигателя сопровождается броском скорости и момента, после завершения переходного процесса скорость устанавливается на уровне номинальной, момент = 0 (режим холостого хода). После наброса нагрузки в момент времени 0,2 происходит временная просадка скорости и бросок момента. После завершения переходного процесса, скорость возвращается к номинальному значению 1,7 о.е. а момент =1, что равно номинальному моменту 220 Н.

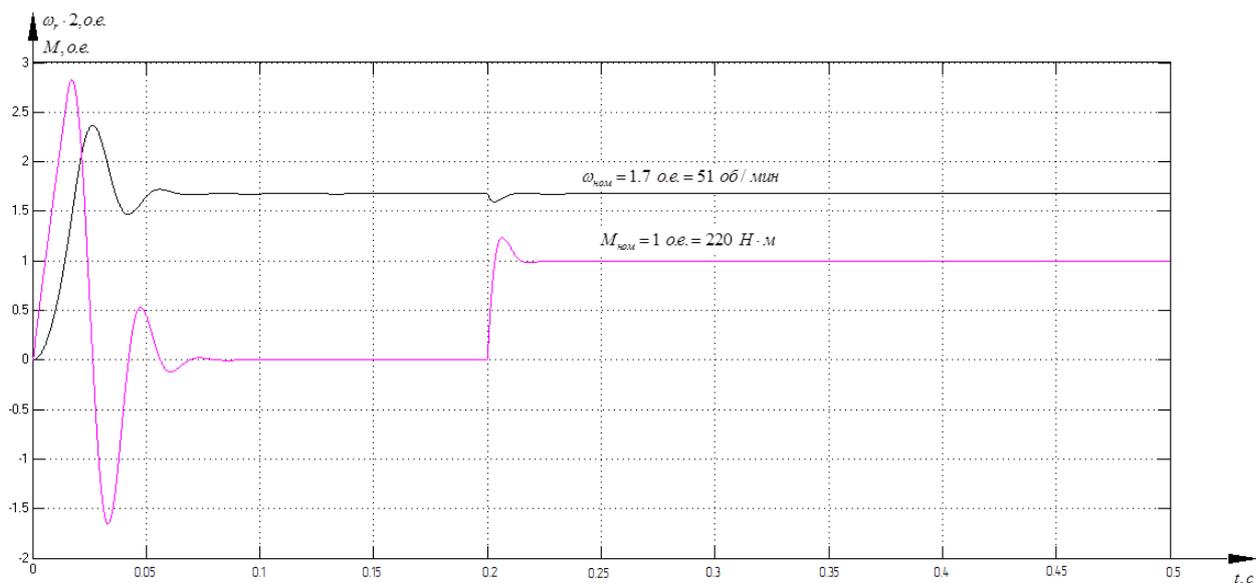


Рисунок 18 – Графики переходных процессов момента и скорости при прямом пуске ТАД с последующим набросом нагрузки

Руководствуясь вышесказанным, можно сделать вывод, что имитационная модель тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мало по своему поведению схожа с моделями общепромышленных асинхронных двигателей. Следовательно, можем считать, что модель является адекватной для исследования.

4.2. Создание системы управления ТАД

Согласно требованиям, предъявляемым к лифтовым установкам, необходимо построить систему управления тихоходным асинхронным двигателем. Повсеместно при разработке систем управления для безредукторных лифтовых лебёдок на основе тихоходных АД используется ТОЛЬКО классическая система векторного управления. Имеется 4 контура управления: 2 для управления составляющими вектора тока статора, контур управления потокоцеплением ротора и контур скорости с обратной связью по датчику скорости (энкодером). Ориентация вращающейся системы координат производится по вектору потокоцепления ротора, а для связи между вращающейся системой координат системы управления и стационарной системой координат модели двигателя применяются прямые и обратные

координатные преобразователи Парка-Горева. Функциональная схема асинхронного двигателя с векторным управлением с использованием датчика скорости представлена на рисунке 19.

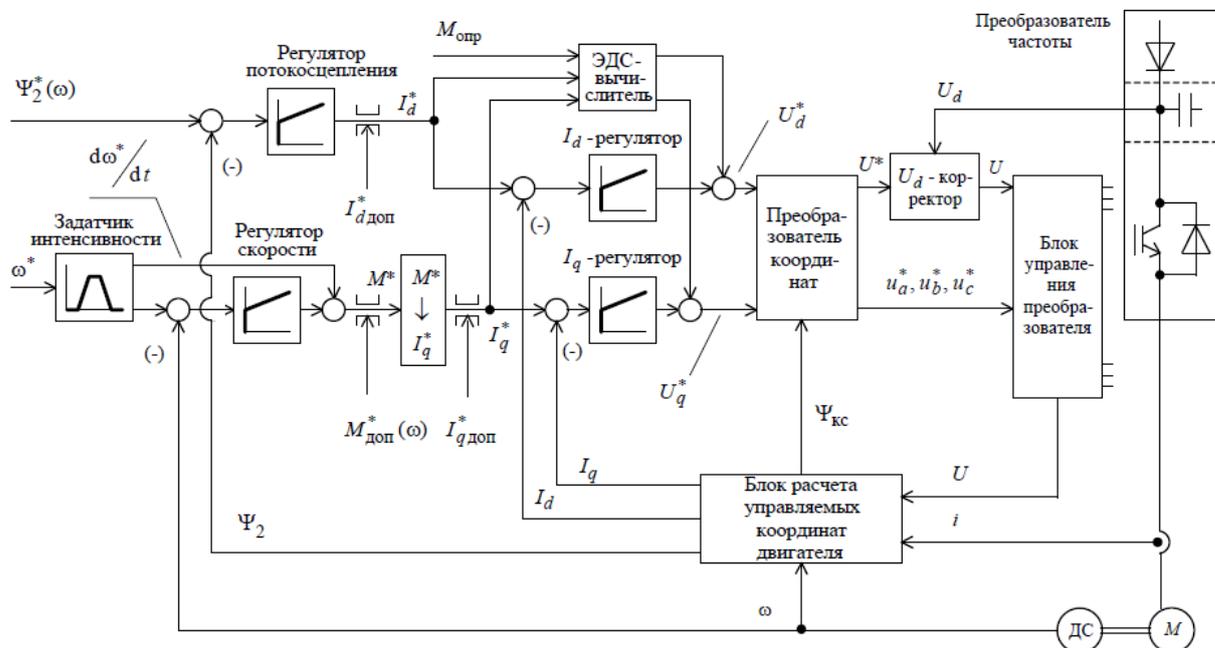


Рисунок 19 - Функциональная схема асинхронного двигателя с векторным управлением с датчиком скорости

Согласно с данной функциональной схемой, необходимо провести структурный и параметрический синтез регуляторов системы управления.

При синтезе регуляторов для управления составляющими вектора тока статора и потокосцеплением ротора использовался метод определения желаемой передаточной функции с настройкой на модульный оптимум.

Для контуров управления частотой вращения и положением, ввиду минимизации ошибки по возмущению использована настройка на симметричный оптимум [14].

4.2.1. Контуры управления составляющими вектора тока статора

Для нахождения требуемой передаточной функции регулятора $W_{\text{рег}}^{i_{sx}}(p)$ выделим из всей системы ЭП отдельно взятый контур, рис. 20 и сопоставим передаточную функцию объекта управления с желаемой с учётом используемой системы относительных единиц. [22]

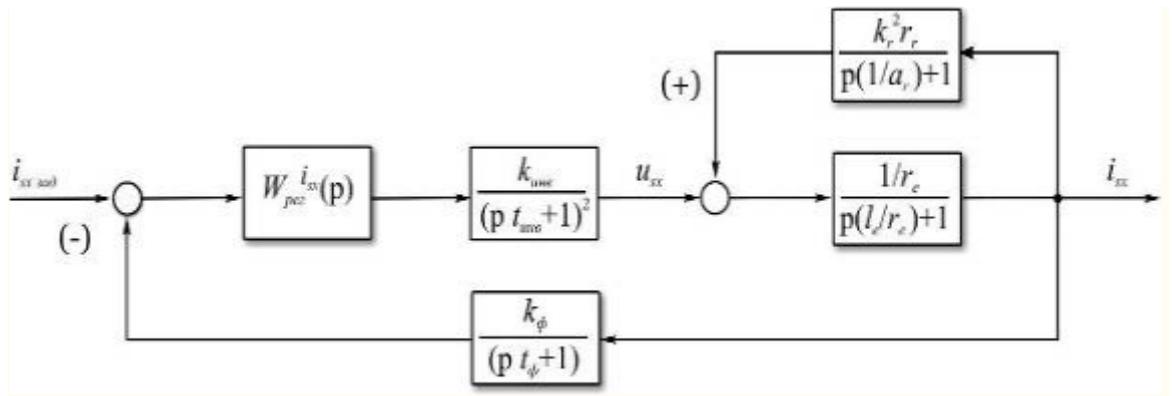


Рисунок 20 – Контур управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sx}

Согласно методике настройки на модульный оптимум, получаем выражение для передаточной функции регулятора:

$$W_{\text{рег}}^{i_{sx}}(p) = W_{\text{рег}}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{1}{\frac{k_{\text{инв}}}{(pt_{\text{инв}} + 1)^2} \cdot \frac{1/r_c}{\left(p \frac{1}{r_c} + 1\right)} \cdot \frac{k_{\text{ф}}}{(pt_{\text{ф}} + 1)}}$$

где $W_{\text{рег}}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{1}{p^2 t_{\mu} (pt_{\mu} + 1)}$ - передаточная функция эталонного разомкнутого

контура, оптимизированного на модульный оптимум, а t_{μ} - малая некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура после оптимизации.

В итоге синтезирован пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{пер}}^{i_{\text{sx}}} = \frac{l_3 / r_3}{2[2t_{\text{инв}} + t_\phi] k_{\text{инв}} k_\phi \frac{1}{r_3}} - \text{коэффициент усиления,}$$

$$t_{\text{пер}}^{i_{\text{sx}}} = \frac{l_3}{r_3} - \text{постоянная времени интегрирования.}$$

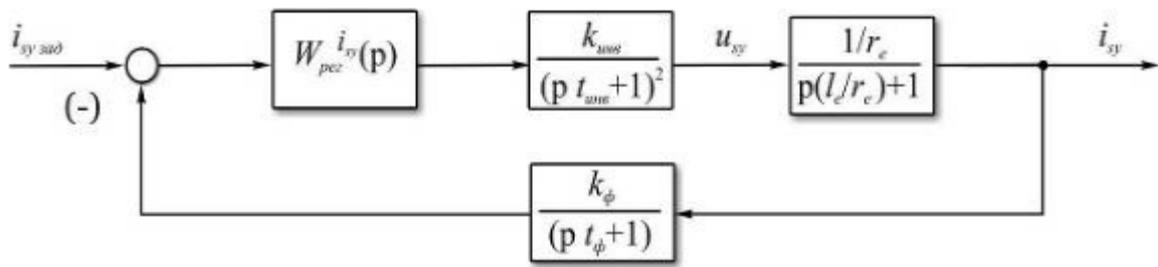


Рисунок 21 – Контур управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy}

Для контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy} принимаем результаты оптимизации, полученные ранее при рассмотрении контура i_{sx} :

$$W_{\text{пер}}^{i_{sy}}(p) = W_{\text{пер}}^{i_{sx}}(p) = W_{\text{пер}}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{(p[2t_{\text{инв}} + t_\phi] + 1)(p \frac{l_3}{r_3} + 1)}{k_{\text{инв}} k_\phi \frac{1}{r_3}}$$

В итоге получаем пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{пер}}^{i_{\text{sx}}} = k_{\text{пер}}^{i_{\text{sy}}} = \frac{l_3 / r_3}{2[2t_{\text{инв}} + t_\phi] k_{\text{инв}} k_\phi \frac{1}{r_3}} - \text{коэффициент усиления,}$$

$$t_{\text{пер}}^{i_{\text{sx}}} = t_{\text{пер}}^{i_{\text{sy}}} = \frac{l_3}{r_3} - \text{постоянная времени интегрирования.}$$

4.2.2. Контур управления потокосцеплением ротора

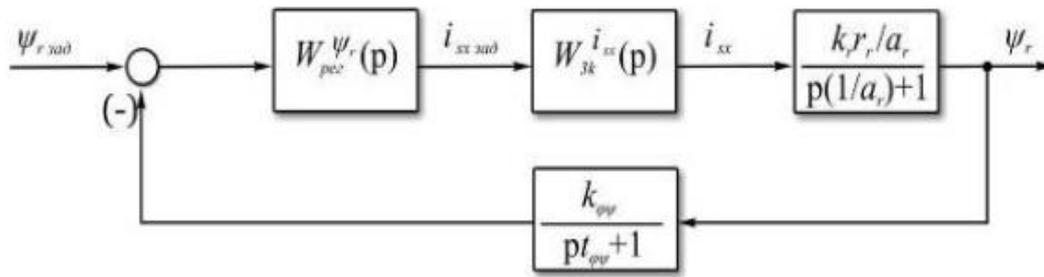


Рисунок 22 – Контур управления потокосцепления ротора Ψ_r

Для передаточной функции регулятора получаем:

$$W_{рег}^{i_{ст}}(p) = W_{рег}^{\Psi_r}(p) = \frac{1}{p 2t_{\mu\psi} (pt_{\mu\psi} + 1)} \cdot \frac{(p[2t_{\mu} + t_{\phi\mu}] + 1) \left(p \frac{1}{a_r} + 1 \right)}{k_r k_{\phi\psi} \frac{r_r}{a_r}}$$

ПИ - регулятор со следующими параметрами:

$$k_{рег}^{\Psi} = \frac{1}{2[2t_{\mu} + t_{\phi\psi}] k_r k_{\phi\psi} r_r} - \text{коэффициент усиления,}$$

$$t_{рег}^{\Psi} = \frac{1}{a_r} - \text{постоянная времени интегрирования.}$$

4.2.3. Контур управления частотой вращения

При оптимизации контура управления частотой вращения ω_r необходимо использовать настройку на симметричный оптимум, так как в данном случае объект управления содержит интегральное звено, что приводит к необходимости использования пропорционального регулятора при настройке на модульный оптимум. Это делает невозможным получение системы астатической по возмущению. Именно поэтому при оптимизации контура скорости используем настройку на симметричный оптимум, а для приближения характеристик контура после оптимизации к характеристикам, соответствующим настройке на модульный оптимум на входе контура установим фильтр в виде аperiодического звена. [30]

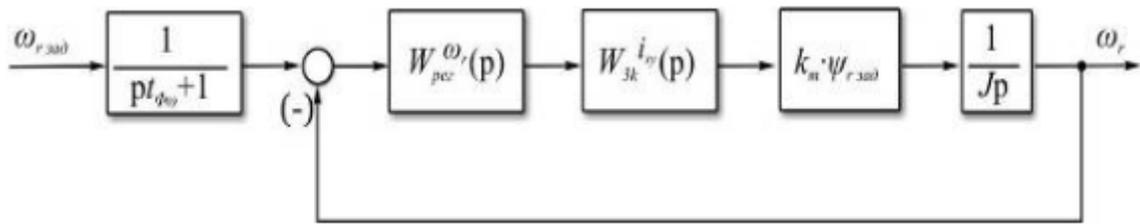


Рисунок 23 – Контур управления частотой вращения ω_r

Согласно методике настройки на симметричный оптимум, получаем выражение для передаточной функции регулятора скорости:

$$W_{\text{рег}}^{\omega} (p) = W_{\text{раз.}\omega}^{\text{CO}} (p) \cdot \frac{J_{\text{экр}} p}{W_{\text{зк}}^{i_{\text{sy}}} (p) k_m \psi_{\text{r.зад}}},$$

где $W_{\text{рег}}^{\text{CO}} (p) \cdot \frac{(p 4 t_{\mu\omega} + 1)}{p^2 8 t_{\mu\omega}^2 (p t_{\mu\omega} + 1)}$ - передаточная функция эталонного

разомкнутого контура, оптимизированного на симметричный оптимум, а $t_{\mu\omega}$ - малая некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура.

$W_{\text{зк}}^{i_{\text{sy}}} (p) = \frac{1}{p 2 t_{\mu} (p t_{\mu} + 1) + 1}$ - передаточная функция замкнутого контура

управления составляющей вектора тока i_{sy} , в данном случае являющаяся подчиненным контуром для контура частоты вращения.

Итоговое выражение для передаточной функции регулятора в контуре скорости:

$$W_{\text{рег}}^{\omega} (p) = \frac{(p 32 t_{\mu} + 1)(p 2 t_{\mu} + 1) J_{\text{экр}} p}{p^2 8 (t_{\mu})^2 (p 8 t_{\mu} + 1) k_m \psi_{\text{r.зад}}}.$$

Выражение передаточной функции имеет «неудобный» вид для синтеза регулятора. Предполагается с учетом некоторых допущений, связанных с пренебрежением постоянными времени высших порядков выполнить ряд преобразований над числителем для его представления в более «удобном» виде.

$$(p 32 t_{\mu} + 1)(p 2 t_{\mu} + 1) \approx (p 32 t_{\mu} + 1) \approx (p 26 t_{\mu} + 1)(p 8 t_{\mu} + 1).$$

С учетом преобразований, получаем:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = \frac{(p26t_{\mu} + 1)(p8t_{\mu} + 1)J_{\text{экв}} p}{p^2 8(t_{\mu})^2 (p8t_{\mu} + 1) k_m \psi_{r.\text{зад}}} = \frac{(p26t_{\mu} + 1)J_{\text{экв}}}{p512t_{\mu}^2 k_m \psi_{r.\text{зад}}} = \frac{26J}{512t_{\mu}^2 k_m \psi_{r.\text{зад}}} \cdot \frac{(p26t_{\mu} + 1)}{p26t_{\mu}}$$

В результате синтеза был получен пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{рег}}^{\omega} = \frac{26J}{512t_{\mu}^2 k_m \psi_{r.\text{зад}}} - \text{коэффициент усиления,}$$

$$t_{\text{рег}}^{\omega} = \frac{(p26t_{\mu} + 1)}{p26t_{\mu}} - \text{постоянная времени интегрирования регулятора скорости.}$$

4.2.4. Контур управления положением

Согласно иерархии подчинённого регулирования, для контура управления частотой вращения внешним является контур управления положением. При оптимизации контура управления положением предполагаем использование настройки на симметричный оптимум [30].

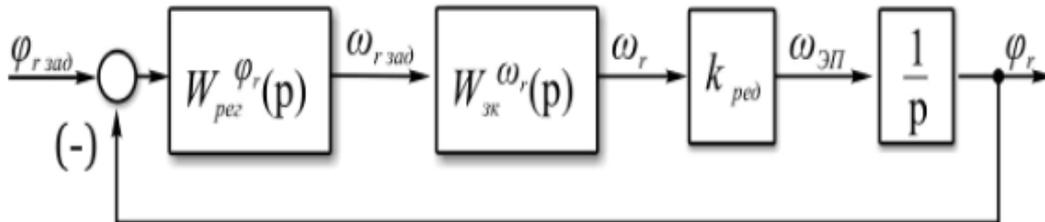


Рисунок 24 – Контур управления положением φ_r

Согласно методике настройки на симметричный оптимум, получаем необходимое выражение для передаточной функции регулятора

$$W_{\text{рег}}^{\varphi}(p) = W_{\text{раз.}\varphi}^{\text{CO}}(p) \cdot \frac{1}{W_{\text{ЭК}}^{\omega_r}(p) \frac{1}{p} k_{\text{ред}}},$$

где $W_{\text{рег}}^{\text{CO}}(p) \cdot \frac{(p4t_{\mu\varphi} + 1)}{p^2 8t_{\mu\varphi}^2 (pt_{\mu\varphi} + 1)}$ - передаточная функция эталонного

разомкнутого контура, оптимизированного на симметричный оптимум, а $t_{\mu\varphi}$ -

малая некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура.

$$W_{\text{ЗК}}^{\omega_r}(p) = \frac{1}{p^2 8 t_{\mu\omega}^2 (p t_{\mu\omega} + 1) + p 4 t_{\mu\omega} + 1} - \text{передаточная функция замкнутого}$$

контура управления частотой вращения ротора ω_r , настроенного на симметричный оптимум с фильтром на входе и являющегося подчиненным относительно контура положения.

В стремлении понизить порядок передаточной функции объекта управления допустимо не учитывать постоянные времени высших порядков. Применительно к замкнутому контуру скорости $W_{\text{ЗК}}^{\omega_r}(p)$ это выглядит следующим образом:

$$W_{\text{ЗК}}^{\omega_r}(p) = \frac{1}{p^2 8 t_{\mu\omega}^2 (p t_{\mu\omega} + 1) + 34 t_{\mu\omega} + 1} = \frac{1}{p^2 8 t_{\mu\omega}^3 p^2 8 t_{\mu\omega}^2 + p 4 t_{\mu\omega} + 1} \approx \frac{1}{p 4 t_{\mu\omega} + 1}$$

С учётом допущения получаем следующее выражение для передаточной функции регулятора в контуре положения:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = W_{\text{раз.ф}}^{\text{CO}}(p) \cdot \frac{p(p 4 t_{\mu\omega} + 1)}{k_{\text{ред}}}$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре положения принимаем значение:

$$t_{\mu\phi} = 4 t_{\mu\omega}$$

Итоговое выражение для передаточной функции регулятора в контуре скорости:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = \frac{(p 4 t_{\mu\phi} + 1)}{p^2 8 t_{\mu\phi}^2 (p t_{\mu\phi} + 1)} \cdot \frac{p(p 4 t_{\mu\omega} + 1)}{k_{\text{ред}}} = \frac{1}{2 t_{\mu\phi} k_{\text{ред}}} \cdot \frac{(p 4 t_{\mu\phi} + 1)}{p 4 t_{\mu\phi}}$$

С учетом преобразований, получаем:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = \frac{(p 26 t_{\mu} + 1)(p 8 t_{\mu} + 1) J_{\text{эkv}} p}{p^2 8 (t_{\mu})^2 (p 8 t_{\mu} + 1) k_m \psi_{\text{г.зад}}} = \frac{(p 26 t_{\mu} + 1) J_{\text{эkv}}}{p 512 t_{\mu}^2 k_m \psi_{\text{г.зад}}} = \frac{26 J}{512 t_{\mu}^2 k_m \psi_{\text{г.зад}}} \cdot \frac{(p 26 t_{\mu} + 1)}{p 26 t_{\mu}}$$

По итогам синтеза оказался получен пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{рег}}^{\varphi} = \frac{1}{2t_{\mu\varphi}k_{\text{ред}}} - \text{коэффициент усиления,}$$

$$t_{\text{рег}}^{\varphi} = 4t_{\mu\varphi} - \text{постоянная времени интегрирования регулятора скорости,}$$

$$t_{\text{фф}} = 4t_{\mu\varphi} - \text{постоянная времени входного фильтра.}$$

4.2.5. Задатчик интенсивности

Основываясь на модели прямого пуска ТАД в неподвижной системе координат, при пуске скорость и момент нарастают скачком, что неприемлемо для использования в лифтовых установках. Поэтому для сглаживания нелинейностей при пуске и остановке необходимо применить задатчик интенсивности. [30]

Задатчик интенсивности с S-образной характеристикой (рис.25) позволит дополнительно ограничить вторую производную скорости (темп нарастания динамического момента электропривода) и тем самым повысить плавность переходных процессов в электроприводе.

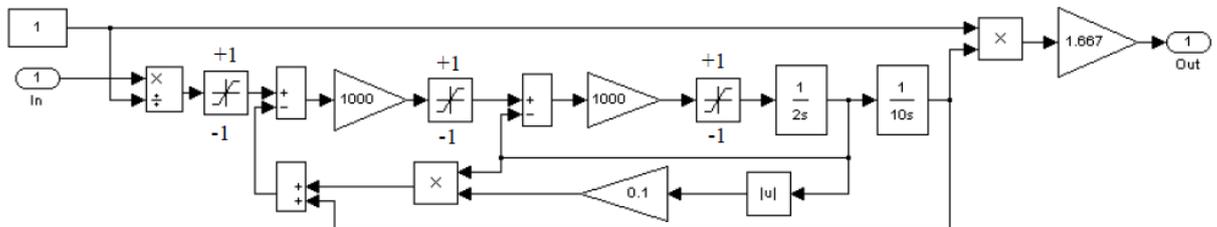


Рисунок 25 - Схема набора имитационной модели S-Образного задатчика интенсивности

4.2.6. Структурная схема нелинейной системы управления ТАД с векторным управлением с датчиком скорости

После расчета необходимых регуляторов и выбора задатчика интенсивности, сформируем структурную схему управления электроприводом (рис.26).

В качестве модели двигателя выступает структурная модель тихоходного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат.

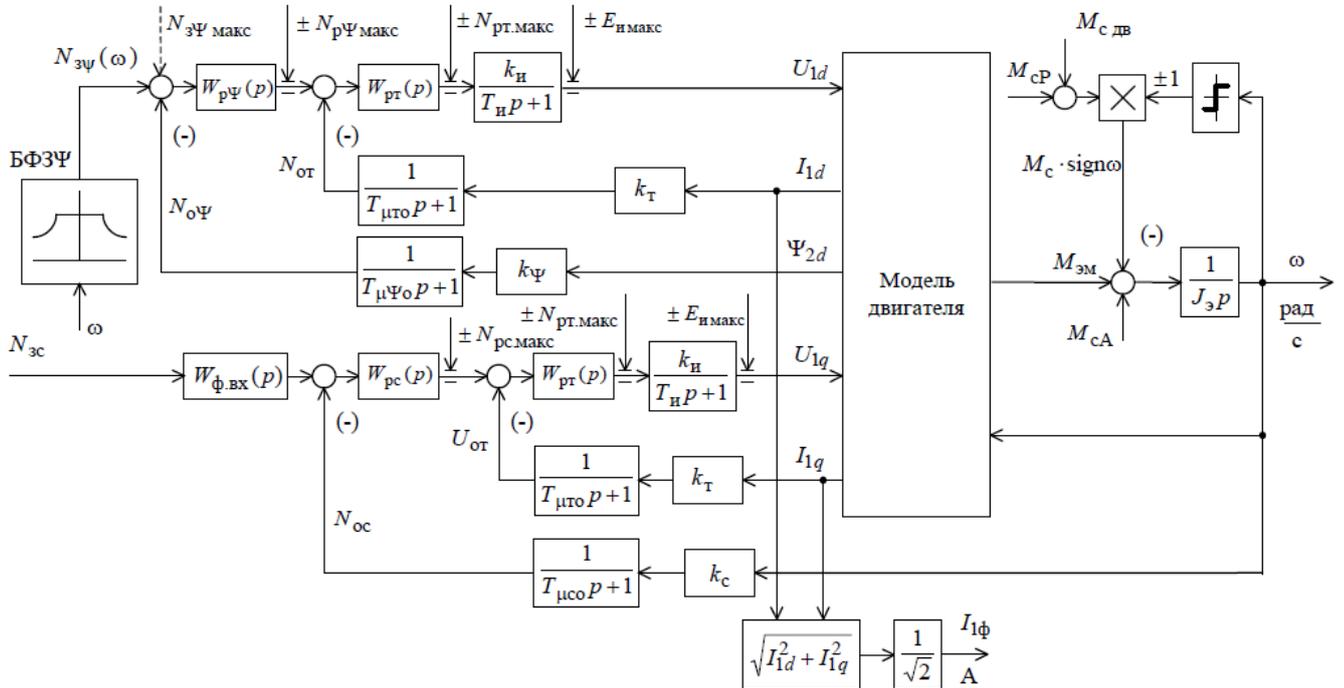


Рисунок 26 – Структурная схема нелинейной системы автоматического управления асинхронного электропривода с векторным управлением

Имитационная модель, собранная в программе MATLAB Simulink 2014b представлена в приложении В.

Результаты моделирования векторной системы управления тихоходного асинхронного двигателя с учетом нелинейностей, с регуляторами тока, скорости, потокосцепления, и с задатчиком интенсивности скорости приведены на рисунках 27,28.

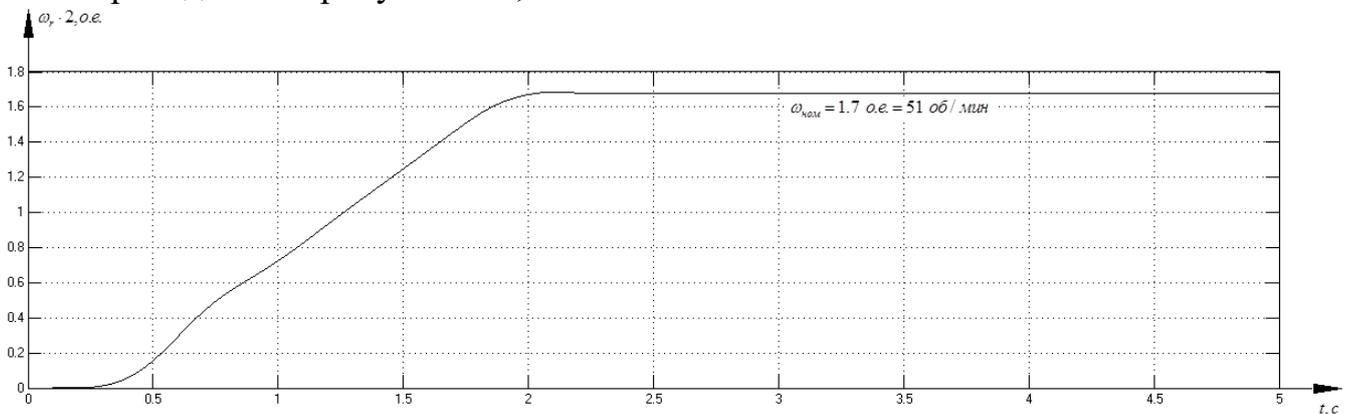


Рисунок 27 – График переходного процесса скорости вращения ТАД

По графику видно, что с использованием S-образного задатчика интенсивности скорости, при пуске двигателя с номинальной нагрузкой скорость на валу двигателя нарастает плавно и достигает номинального значения спустя 2 секунды после пуска. Плавное нарастание скорости необходимо для комфортного начала и окончания движения.

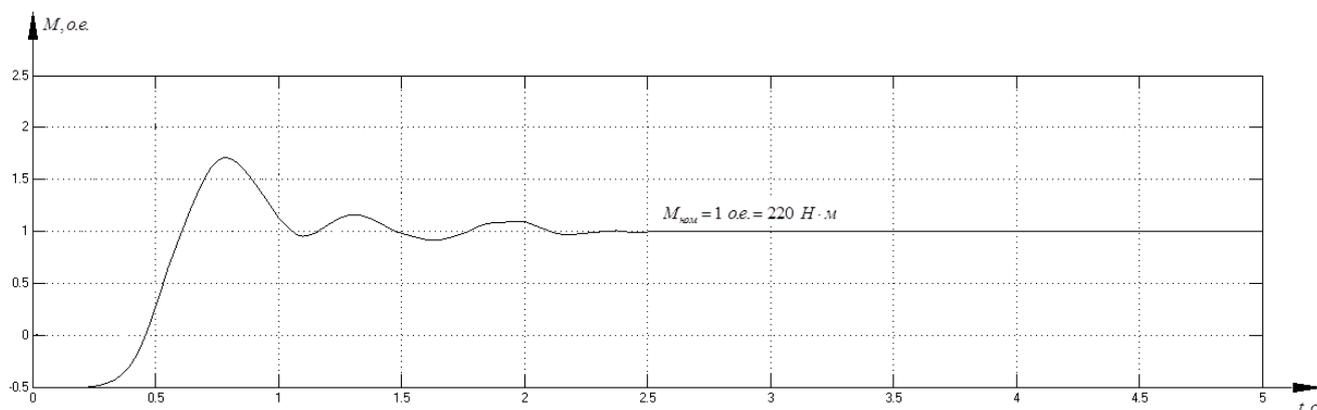


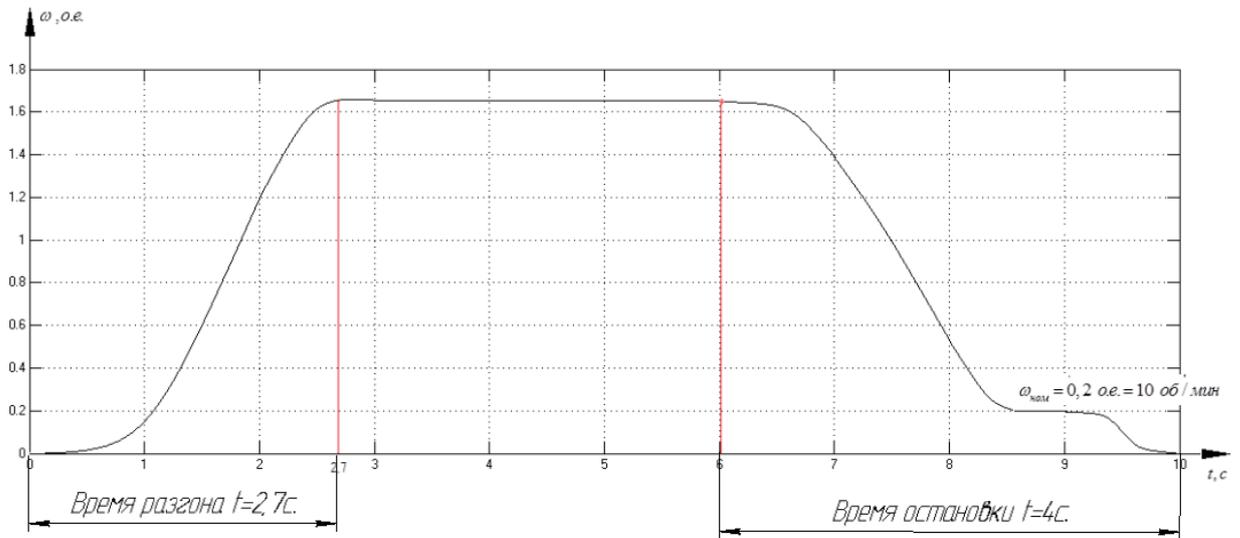
Рисунок 28 – График переходного процесса момента ТАД при плавном пуске

Как видно из графика, при плавном пуске ТАД с разработанной системой управления, колебания момента уменьшились почти в 2 раза.

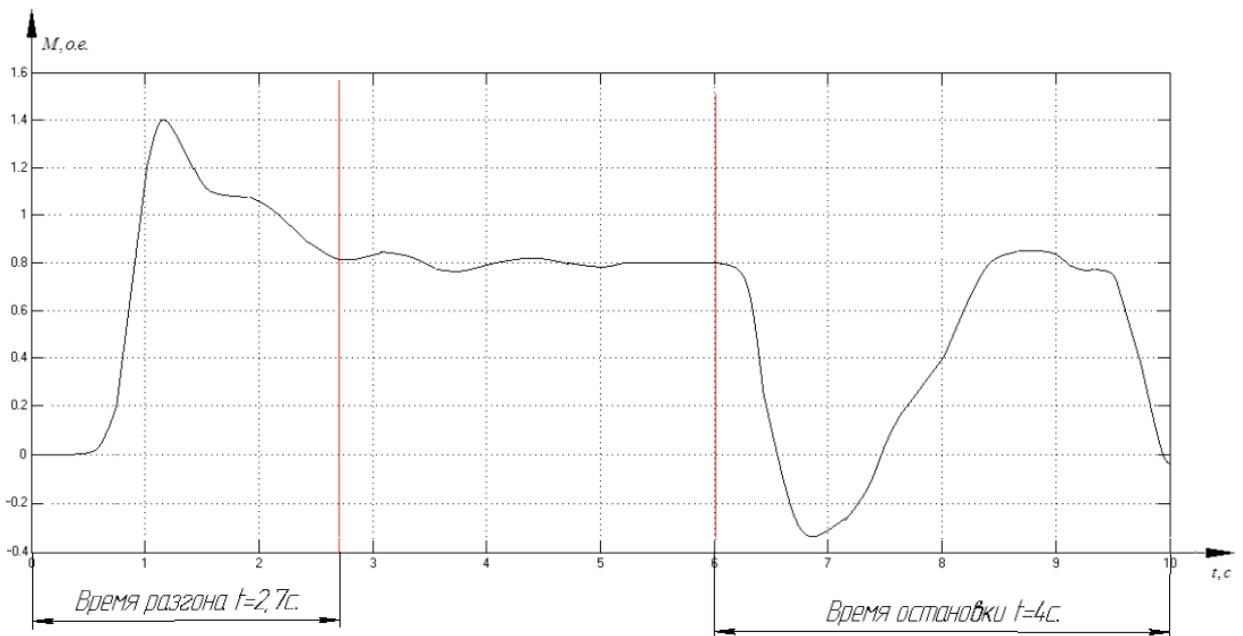
4.3. Имитационная модель тихоходного электропривода с учетом работы с безредукторной лифтовой лебедкой, выполненной в виде трехмассовой системы.

В данном разделе применим к выше изложенной модели нагрузку безредукторной лифтовой лебедки. Таким образом полученная модель будет заключать в себе: имитационную модель тихоходного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат, имитационную модель безредукторной лифтовой лебедки в виде трехмассовой механической системы, систему автоматического управления двигателем, представленную в виде векторного управления с датчиком тока, регуляторами тока, скорости, потокосцепления; устройством плавного пуска выступает S-Образный задатчик интенсивности. Имитационная модель представлена в приложении Г.

Переходные процессы скорости на валу двигателя и момента представлены на рисунке 29 а,б.



а)



б)

Рисунок 29 – Переходные процессы разработанного электропривода. а) скорости; б) момента

По результатам моделирования можно сделать вывод, что с помощью S-образного задатчика интенсивности обеспечивается плавный разгон двигателя, время разгона до выхода на номинальную скорость составляет 2,7с.

Далее, с помощью задатчика интенсивности, смоделирован режим остановки кабины: кабина, двигаясь с номинальной скоростью, приближается

к этажу остановки, датчики фиксируют приближение кабины и подают сигнал на снижение скорости; далее при непосредственной близости к этажу остановки, кабина выходит на пониженную скорость при которой можно совершить точную остановку на уровне этажа.

По переходному процессу момента двигателя видно, что нагрузка в виде безредукторной лебедки, выполненной в трехмассовой система, отличается от одномассовой подачи нагрузки. Таким образом, при пуске наблюдается скачок момента, существуют определённые нелинейности даже после выхода на номинальную скорость. При достижении датчиков точной остановки, срабатывает тормоз, чтобы вывести двигатель на пониженную скорость, поэтому видна просадка момента, далее момент возвращается к номинальному значению (движение на пониженной скорости). Очередная просадка момента наблюдается при конечной остановке двигателя.

Также можно отметить, что нагрузка в виде безредукторной лебедки оказалась немного меньше, чем номинальный момент двигателя. Это явление не критично, так как лифт редко работает с максимально загрузкой кабины. Чаще всего кабина загружена на 30-60%. Поэтому недоработка не сильно скажется на ресурсе двигателя и энергопотреблении в целом.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технического проекта, выполняемого в рамках магистерской диссертации, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

5.1. Организация работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического задания;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения моделирования электропривода.

Для выполнения проекта формируется рабочая группа в составе:

- 1) Научный руководитель;
- 2) Инженер.

На определенный вид работы назначается соответствующая должность исполнителя.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 11.

Таблица 11 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя	Длительность работ в рабочих днях
Разработка и выдача технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель Инженер	1
Выбор направления дальнейшей работы по диссертации	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	8
Расчеты и моделирование преобразователя напряжения	3	Изучение патентной базы	Инженер	10
	4	Литературный обзор	Инженер	20
	5	Анализ требований к лифтовому оборудованию	Инженер	2
	6	Математическое описание ТАД	Инженер	5
	7	Математическое описание механической части	Инженер	10
	8	Система относительных единиц и составление структурных схем	Инженер	5
	9	Имитационное моделирование электропривода лифта	Инженер	10
Написание статьи в научный журнал	10	Формирование текущих результатов в статью	Инженер	2
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель Инженер	6
Оформление отчета	12	Составление пояснительной записки	Инженер	12
	13	Проверка магистерской диссертации	Научный руководитель Инженер	2
	14	Исправление ошибок	Инженер	2
Защита магистерской диссертации	15	Подготовка к защите магистерской диссертации	Инженер	5

Продолжительность выполнения проекта составит 100 рабочих дней.

Из них:

9 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

100 дней – продолжительность выполнения работ инженером.

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения технических 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 [42].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки магистерской диссертации. На основе таблицы 11 строим план – график проведения работ (Приложение Д).

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная с первой декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Далее по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя.

5.2. Смета затрат на проектирование

Смета затрат на проект (K_{np}) включает в себя материальные затраты, амортизацию, затраты на заработную плату, на социальные нужды, прочие и накладные затраты.

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} . \quad (5.2.1)$$

Где K_{mat} – материальные затраты;

$K_{ам}$ – амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$ – затраты на заработную плату;

$K_{с.о}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{накл}$ – накладные затраты.

5.2.1. Материальные затраты

В данной работе материальные затраты принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские товары.

5.2.2. Затраты на амортизацию

Для работы над проектом используется только компьютерная техника, посчитаем ее амортизацию:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \text{ где} \quad (5.2.2.1)$$

$T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники (92 дня)

$T_{кал}$ – календарное время (365 дней)

$Ц_{кт}$ – цена компьютерной техники (25000 руб)

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет)

$$K_{ам} = \frac{92}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1260 \text{ руб} \quad (5.2.2.2)$$

5.2.3. Затраты на заработную плату

Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР).

$$Kз / пл = ЗПинж + ЗПнр \quad (5.2.3.1)$$

$$ЗПмес = ЗПо \cdot K1 \cdot K2, \text{ где} \quad (5.2.3.2)$$

$K1$ – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%)

$K2$ – районный коэффициент (1,3=30%)

$ЗПо$ – месячный оклад (для профессора 30000 р., для инженера 17000р.).

Для научного руководителя:

$$ЗПмес = 30000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42900 \text{ руб.} \quad (5.2.3.3)$$

Для инженера:

$$ЗПмес = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.} \quad (5.2.3.4)$$

$$ЗПо = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n, \text{ где} \quad (5.2.3.5)$$

21 – число рабочих дней в месяц

n – Фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$ЗПор = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n = \frac{42900}{21} \cdot 9 = 18386 \text{ руб.}, \quad (5.2.3.6)$$

Для инженера:

$$ЗПор = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 100 = 115762 \text{ руб.}, \quad (5.2.3.7)$$

Затраты на заработную плату для инженера и научного руководителя составляют:

$$Kз / пл = 115762 + 18386 = 134148 \text{ руб.} \quad (5.2.3.8)$$

5.2.4. Затраты на социальные нужды

Затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непроизводственной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством. [43]

Затраты на социальные нужды берутся в размере 30% от $Kз/пл$.

$$K_{с.о.} = \frac{Kз / пл \cdot 30\%}{100\%} = \frac{134148 \cdot 0,3}{1} = 40244 \text{ руб.} \quad (5.2.4.1.)$$

5.2.5. Прочие затраты

Прочие затраты, принимаются в размере 10% от ($K_{мат} + K_{ам} + Kз/пл + K_{с.о.}$).

$$\begin{aligned} K_{пр} &= \frac{(K_{мат} + K_{ам} + Kз / пл + K_{с.о.}) \cdot 10\%}{100\%} = \\ &= \frac{(1000 + 1260 + 134148) \cdot 0,1}{1} = 13640 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.2.5.1)$$

5.2.6. Накладные расходы

Затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от $Kз/пл$.

$$K_{накл} = \frac{Kз / пл \cdot 200\%}{100\%} = \frac{134148 \cdot 2}{1} = 268296 \text{ руб.} \quad (5.2.6.1)$$

Полученные результаты отображены в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты полученных данных

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1260
3	Затраты на заработную плату	137349
4	Затраты на социальные нужды	41244
5	Прочие затраты	13640
6	Накладные расходы	274698
	Итого:	462789

Смета затрат на проект (K_{np}):

$$\begin{aligned} K_{np} &= K_{mat} + K_{ам} + K_{з / пл} + K_{с.о} + K_{np} + K_{накл} = \\ &= 1000 + 1260 + 134148 + 40244 + 13640 + 268296 = 462789 \text{ руб} \end{aligned} \quad (5.2.6.2)$$

5.3. Анализ полученных результатов

Данный технический проект включает в себя разработку математического описания и структурных схем безредукторного лифтового электропривода и его механической части, имитационное моделирование процессов, подтверждающее адекватность разработанных схем.

Технические данные задания:

Грузоподъемность – 400 кг.

Скорость подъема кабины 1 м/с;

Продолжительность включения 60%

Точность остановки кабины +-5 см;

Плавность пуска и остановки

В конечном результате технического проекта был спроектирован безредукторный электропривод передвижения кабины пассажирского лифта по системе ПЧ-АД, удовлетворяющий требованиям задания и ПУЭБЛ. Следовательно, можно сделать вывод, что проект выполнен в полном объеме:

- Разработано математическое описание для ЭП и его механической части. На основе математических уравнений построена структурная схема для изучения работы электропривода с безредукторной лебедкой;

- С помощью программного пакета Matlab 2014b, построена имитационная схема, подтверждающая работоспособность проектируемой установки;

- По результатам моделирования подтверждено, что разработанная система соответствует требованиям задания, а именно:

- обеспечивается комфортное перемещение со максимальной скоростью 1 м/с, плавность пуска соответствует человеческой переносимости ускорения (не более 2 м/с^2);

- Станция управления на основе преобразователя частоты фирмы «ЭЛЕСИ» с помощью датчиков точной остановки обеспечивает точную остановку кабины на уровне этажа $\pm 3 \text{ см}$;

- Использование безредукторного электропривода увеличивает срок службы лифтовой установки, а также экономит затраты на электроэнергию. В проекте установлено, что разработанный ЭП с безредукторной лебедкой позволяет экономит электроэнергию на 10-15% по сравнению с редукторным электроприводом. А с использованием рекуператора энергии экономия по сравнению с редукторным электроприводом составит около 70%.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

6.1. Введение

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения необходимых условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам экологической безопасности и обеспечение безопасности в ЧС.

В настоящей выпускной квалификационной работе произведена разработка регулируемого безредукторного электропривода лифта на основе тихоходного асинхронного двигателя. Работа проводится в помещении закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха. Помещение имеет как искусственный, так и естественный источник освещения. Основное рабочее оборудование – ПЭВМ.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

6.2. Описание и анализ опасных и вредных факторов

При эксплуатации лифтового электропривода необходимо учитывать наличие и возможность воздействия следующих вредных производственных факторов [44]:

- нарушение окружающей среды в помещении — очень низкая или очень высокая температура, высокая влажность, ветер, сквозняки;
- повышенного уровня шума и вибраций;
- недостаточной освещенности рабочей зоны;
- недопустимая загрязненность воздуха пылью, газами или парами;

6.2.1. Микроклимат в помещении

Понятие «климат» определяется температурой, влажностью, степенью излучений и скоростью движения воздуха. Для нормальной жизнедеятельности человека необходимо, чтобы температура его тела была постоянной — около 37 °С, а тепловой баланс тела выравнивался за определенный промежуток времени, т. е. восприятие тепла должно быть таким, как и отдача его в окружающую среду. На теплообмен влияет климат, который является благоприятным тогда, когда для обеспечения теплового баланса не требуется применения специальных регулирующих устройств, и неблагоприятным, когда без применения таких устройств не может наступить равновесия между восприятием и отдачей тепла. Тепловые излучения — это излучения, энергия которых распространяется невидимыми глазом человека инфракрасными лучами. Источниками тепловых излучений являются все нагретые тела: расплавленные и нагретые металлы, работающие электродвигатели, крановые резисторы, осветительные лампы (95 % энергии ламп накаливания тратится на нагрев и только не более 5 % — на световое излучение).

Относительная влажность, определяемая как отношение содержания водяных паров воздуха к их максимально возможному содержанию в процентах, характеризует влажность воздуха при определенной температуре.

При значительном перегреве организма возникает опасное заболевание, связанное с нарушением работы сердечно-сосудистой системы, называемое тепловым ударом, который в тяжелых случаях может быть смертельным.

В зависимости от наличия в помещении источников тепла и опасности перегрева для поддержания нормального микроклимата применяется вентиляция или более совершенное средство — кондиционирование воздуха.

Вентиляция и кондиционирование воздуха не защищают организм от тепловых лучей [45].

6.2.2. Шум и вибрация

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа вентилятора главного проветривания и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Для защиты от шума по [49] и вибрации по [50] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты (ГОСТ 12.4.011 – 89);
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Снижение шума от вращающихся частей машин достигается созданием более гладких их поверхностей, большой точностью балансировки, применением высококачественных подшипников. Большое значение имеет также правильный уход за оборудованием, надлежащая смазка и устранение биения в соединительных муфтах и редукторах. Для индивидуальной защиты рабочих от шума применяют вкладыши из ваты или пробки из губчатой резины, закладываемые в отверстие уха, а также специальные наушники или шлемы, плотно закрывающие ухо. [48].

6.2.2. Недостаточная освещенность

Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов [47].

Установлено, что свет, помимо обеспечения зрительного восприятия, воздействует на нервную оптико-вегетативную систему, систему формирования иммунной защиты, рост и развитие организма и влияет на многие основные процессы жизнедеятельности, регулируя обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды. Сравнительная оценка естественного и искусственного освещения по его влиянию на работоспособность показывает преимущество естественного света.

Важно отметить, что не только уровень освещенности, а все аспекты качества освещения играют роль в предотвращении несчастных случаев. Можно упомянуть, что неравномерное освещение может создавать проблемы адаптации, снижая видимость. Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности. В ряде случаев это может привести к головным болям. Причинами во многих случаях являются слишком низкие уровни освещенности, слепящее действие источников света и соотношение яркостей. Головные боли также могут быть вызваны пульсацией освещения. Таким образом, становится очевидно, что неправильное освещение представляет значительную угрозу для здоровья работников.

Для оптимизации условий труда имеет большое значение освещение рабочих мест. Задачи организации освещенности рабочих мест следующие:

обеспечение различаемости рассматриваемых предметов, уменьшение напряжения и утомляемости органов зрения. Производственное освещение должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Различают естественное, искусственное и совмещенное освещение.

Обследование условий освещения заключается в замерах, визуальной оценке или определении расчетным путем следующих показателей:

- коэффициент естественной освещенности;
- освещенность рабочей поверхности;
- показатель ослепленности;
- отраженная блёсткость;
- коэффициент пульсации освещенности;
- освещение на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ;

Обеспечение требований санитарных норм к факторам световой среды для рабочих мест персонала, занятого на зрительно напряженных работах, и для рабочих мест в учебных классах и аудиториях образовательных учреждений является важным фактором создания комфортных условий для органа зрения.

Среди качественных показателей световой среды очень важным является коэффициент пульсации освещенности (Кп). Коэффициент пульсации освещенности — это критерий оценки глубины колебаний (изменений) освещенности, создаваемой осветительной установкой, во времени.

Требования к коэффициенту пульсации освещенности наиболее жесткие для рабочих мест с ПЭВМ — не более 5%. Для других видов работ

требования к коэффициенту пульсации освещенности (K_p) менее жесткие, но величина K_p должна быть не более 15%. Лишь для самых грубых зрительных работ допускается большее значение (K_p), но не более 20%.

Местное освещение (если его применяют) не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана ПЭВМ более 300 лк. Следует ограничивать прямую и отраженную блесткость от любых источников освещения.

Нередко наибольшее неудобство пользователям доставляет повышенная отражательная способность экранов мониторов и некачественных приэкранных фильтров (если они установлены на экраны дисплеев). Это вызывает дополнительную усталость глаз. Чтобы ее уменьшить, во многих учреждениях пользователи сами отключают часть светильников и работают при минимальной освещенности, как на рабочем месте, так и на различных поверхностях.

Такой характер работы следует считать недопустимым, т.к. при этом освещенность на сетчатке глаза от любого знака, требующего различения, оказывается ниже физиологически необходимой величины, равной 6–6,5 лк. Необходимая освещенность регулируется размером зрачка от 2 мм (при очень высокой освещенности) до 8 мм (при предельно низкой освещенности для самых грубых работ). Установлено, что уровни оптимальной яркости поверхностей находятся в пределах от 50 до 500 д/м². Оптимальная яркость экрана дисплея составляет 75–100 кд/м². При такой яркости экрана и яркости поверхности стола в пределах 100–150 кд/м² обеспечивается продуктивность работы зрительного аппарата на уровне 80–90 %, сохраняется постоянство размера зрачка на допустимом уровне 3–4 мм.

Поэтому, «борясь» указанным выше способом с бликами на экране дисплея, пользователи одновременно создают сами себе другие

неблагоприятные условия. В частности, значительно увеличивается нагрузка на мышцы глаз. Это вызывает повышенную усталость органа зрения, а в последующем — развитие близорукости.

Реально несоблюдение требований норм по освещенности и по яркости имеет место более чем на 40 % рабочих мест. Рекомендации по обеспечению требований норм хорошо известны. Как правило, для этого бывает достаточно установить дополнительное количество светильников и немного изменить ориентацию рабочих столов по отношению к источникам света. Более сложно бывает выполнить требование норм по коэффициенту пульсации (далее - Кп) освещенности.

К сожалению, на значительное несоответствие нормам во многих организациях не обращают внимания. И напрасно. Установлено, что реально повышенная пульсация освещенности оказывает негативное воздействие на центральную нервную систему, причем в большей степени — непосредственно на нервные элементы коры головного мозга и фоторецепторные элементы сетчатки глаз.

Исследования, выполненные в Ивановском НИИ охраны труда, показали, что у человека снижается работоспособность: появляется напряжение в глазах, повышается усталость, труднее сосредотачиваться на сложной работе, ухудшается память, чаще возникает головная боль. Отрицательное воздействие пульсации возрастает с увеличением ее глубины.

У тех, кто работает с экраном дисплея, зрительная работа является наиболее напряженной и существенным образом отличается от других видов работ. По данным Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии АН СССР (РАН России) мозг пользователя ПЭВМ вынужден крайне отрицательно реагировать на два (и более) одновременных, но различных по частоте и некратных друг другу ритма световых

раздражений. При этом на биоритмы мозга накладываются пульсации от изображений на экране дисплея и пульсации от осветительных установок.

Способы снижения коэффициента пульсации освещенности:

- подключение обычных светильников на разные фазы трехфазной сети (два или три осветительных прибора);
- питание двух ламп в светильнике со сдвигом (одну отстающим током, другую опережающим), для чего в светильник устанавливают компенсирующие ПРА;
- использование светильников, где лампы должны работать от переменного тока частотой 400 Гц и выше.

Практика показывает, что в настоящее время в большинстве помещений все ряды светильников подсоединяются к одной фазе сети, поэтому реализация такого технического приема как «расфазировка» светильников нередко затруднена. Поэтому часто наиболее реально осуществимыми являются следующие варианты:

- демонтаж установленных ранее светильников, оснащенных электромагнитными ПРА, и установка на их место новых светильников, оснащенных электромагнитными ПРА (т.е. ЭПРА);

- оставить действующие светильники (если они соответствуют требованиям п. 6.6, 6.7 и 6.10 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03), демонтировать из них электромагнитные ПРА и установить на их место ЭПРА); на демонтаж ПРА монтаж ЭПРА в одном светильнике в среднем затрачивается 15 – 20 минут.

6.3. Анализ опасных факторов

- образование пожароопасных смесей газов, опасность загорания (пожара);

- опасность электропоражения работающего в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;

6.3.1. Загорание (пожар)

Пожары – неконтролируемый процесс горения, которые чреват большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного участка. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемая лаборатория относится к классу Б (наличие горючих волокон или пыли рассматриваемого участка): источником взрыва может послужить короткое замыкание или из - за нарушения электроизоляции.

К первичным средствам пожаротушения относятся:

- все виды переносных и передвижных огнетушителей;
- оборудование пожарных щитов;
- ящики с порошковыми составами (песок, перлит и т.п.), а также огнестойкие ткани (асбестовое полотно, кошма, войлок и т.п.).

Первичные средства пожаротушения размещаются в легкодоступных местах и не должны быть помехой при эвакуации персонала из помещений.

Запрещается использование пожарного инвентаря и других средств пожаротушения для иных нужд, кроме тушения пожаров и обучения персонала.

Использованные или неисправные огнетушители должны быть немедленно убраны из защищаемого помещения и заменены исправными.

Для размещения первичных средств пожаротушения в производственных помещениях, а также на территории предприятий, как правило, должны устанавливаться специальные пожарные щиты.

Допускается одиночное размещение огнетушителей в небольших помещениях.

Размещение огнетушителей и пожарного инвентаря и их количество определяется на основании ПБП и норм расчета первичных средств пожаротушения.

Пожарные щиты предназначены для концентрации и размещения в определенном месте ручных огнетушителей, пожарного инвентаря и инструмента, применяемого при ликвидации загораний.

Дверцы щитов опломбировываются и должны открываться без ключа и больших усилий.

Такие системы должны быть установлены на объектах, где воздействие опасных факторов взрыва и пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [58].

Участок должен быть оснащен такой системой, которая включает систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний [52].

Выбор систем взрывоподавления и пожаротушения для участка требует специального рассмотрения и расчетов.

Основные требования противопожарного режима на любом предприятии следующие. Рабочие места, проходы и проезды необходимо содержать в чистоте; промасленный обтирочный материал собирать в закрывающиеся железные ящики и ежедневно убирать из цеха. В цехах запрещается хранить бензин, керосин, нитрокраски, масло и другие легковоспламеняющиеся и горючие жидкости.

Для хранения спецодежды устраиваются специальные помещения, где загрязненная, промасленная спецодежда хранится в железных шкафах в развернутом виде. В карманах запрещается оставлять промасленную ветошь и тряпки.

В каждом помещении на случай возникновения пожара должна быть обеспечена возможность быстрой и безопасной эвакуации людей через эвакуационные выходы — двери, ворота, проходы. Выходы считаются эвакуационными, если они ведут из помещений: первого этажа непосредственно наружу; в соседние помещения того же этажа, имеющие выход наружу непосредственно или через лестничные клетки; в проход или в коридор с непосредственным выходом наружу или через лестничную клетку.

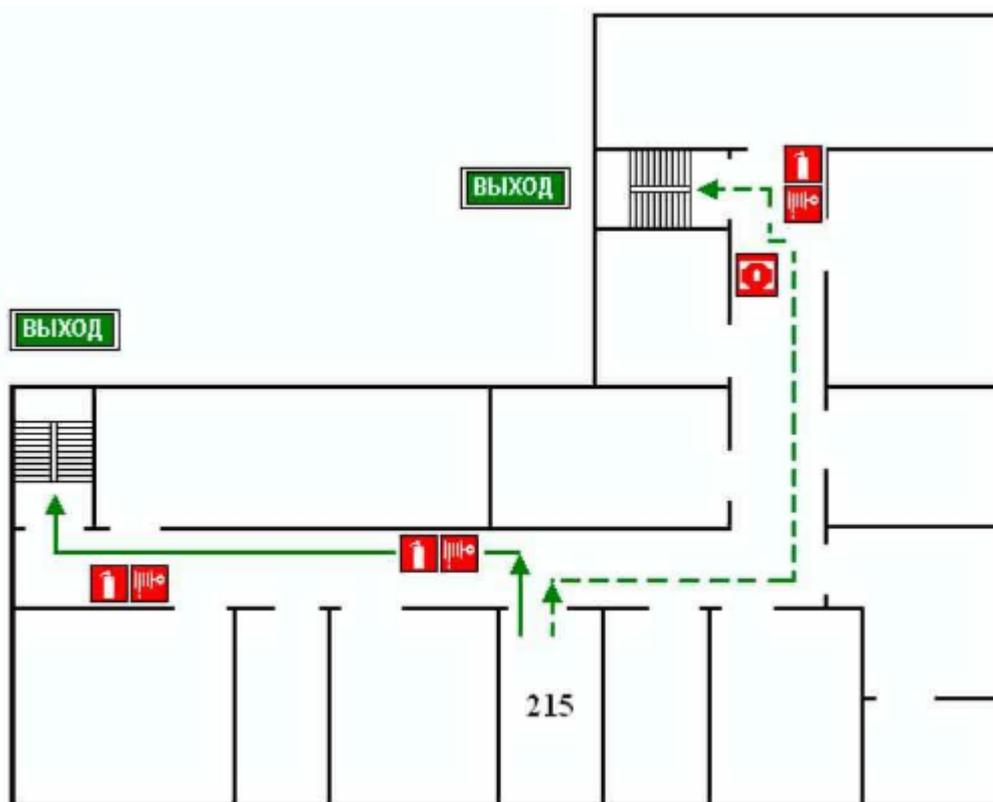


Рисунок 30 – План эвакуации

6.3.2. Электропоражение

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы [51]:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемая лаборатория не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками [53].

Важной мерой, обеспечивающей электробезопасность обслуживающего персонала, является защитное заземление или зануление металлических нетоковедущих частей электрооборудования. В соответствии с Правилами устройства электроустановок защитным заземлением, выполняемым для обеспечения электробезопасности, называется преднамеренное металлическое соединение с заземляющим устройством элементов электроустановок, нормально не находящихся под напряжением. Зануление в электроустановках и сетях напряжением до 1000 В — это преднамеренное электрическое соединение металлических элементов установки, нормально изолированных от частей, находящихся под напряжением (корпуса электрооборудования, стальные трубы электропроводок и др.), с

глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях переменного тока, а также с глухозаземленной средней точкой в трехпроводных сетях постоянного тока с нулевым проводом.

Нулевым защитным проводом в электроустановках напряжением до 1000 В называется проводник, соединяющий корпус электрооборудования с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях переменного тока или с глухозаземленной средней точкой в трехпроводных сетях постоянного тока.

Защитное заземление при повреждении изоляции и переходе напряжения на части металлической конструкции электроустановки автоматически отключает поврежденное электрооборудование или снижает напряжение на частях конструкции до безопасного значения. Индивидуальные защитные средства (изоляционные коврики, перчатки, галоши, штанги) и применение тока напряжением 12 (В) для переносных ламп обеспечивают безопасность работы с электроустановками.

6.4. Разработка принятия решений по утилизации отходов

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;

- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специально переработке [55].

Исходя из сказанного выше перед планированием покупки компьютера необходимо:

- Побеспокоится заранее о том, каким образом будет утилизирована имеющаяся техника, перед покупкой новой.
- Узнать насколько новая техника соответствует современным эко-стандартам и примут ее на утилизацию после окончания срока службы.

Утилизировать оргтехнику, а не просто выбрасывать на «свалку» необходимо по следующим причинам:

Во-первых, в любой компьютерной и организационной технике содержится некоторое количество драгоценных металлов. Российским законодательством предусмотрен пункт, согласно которому все организации обязаны вести учет и движение драгоценных металлов, в том числе тех, которые входят в состав основных средств. За несоблюдение правил учета, организация может быть оштрафована на сумму от 20000 до 30000 руб. (согласно ст. 19.14. КоАП РФ);

Во-вторых, предприятие также может быть оштрафовано за несанкционированный вывоз техники или оборудования на «свалку»;

В-третьих, утилизируя технику, мы заботимся об экологии: количество не перерабатываемых отходов минимизируется, а такие отходы, как пластик, пластмассы, лом черных и цветных металлов, используются во вторичном производстве. Электронные платы, в которых содержатся драгметаллы, после переработки отправляются на аффинажный завод, после чего чистые металлы сдаются в Госфонд, а не оседают на свалках.

Таким образом, утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

1. Мониторы с электронно-лучевыми трубками необходимо сдать для переработки в ближайший специализированный центр переработки или передать его изготовителю для дальнейшего рециклинга.

2. Использовать услуги профессиональной компании по рециклингу, которая может приехать и забрать все приборы, которые планируется сдать в переработку.

3. Можно обратиться в местный муниципалитет по вопросу переработки электроники.

5.5. Предотвращение ЧС и устранение последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации в лаборатории, моделирующий названный участок: возникновение пожара и электропоражение.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования[56].

Согласно, пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы

действии администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества

пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

6.6. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно [57] при размещении рабочих мест с ЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Рабочие места с ЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных

конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

Снижению психофизических и нервно-эмоциональных нагрузок способствует правильная организация рабочего места [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации были решены все поставленные задачи.

В первой главе был проведен литературный обзор существующего лифтового оборудования. Произведен поиск патентов новейших разработок в данной сфере. Изучен принцип работы исследуемого механизма. Рассмотрены требования к проектированию лифтового оборудования, согласно с которыми будет производиться дальнейшее исследование.

Во второй главе проведено математическое описание тихоходного асинхронного двигателя и механической части. Выявлено, что описание для тихоходных асинхронных машин имеет аналогичный метод составления дифференциальных уравнений, как и для асинхронных машин общепромышленного назначения.

Механическая часть, представляющая собой безредукторную лебедку, выполнена в виде трехмассовой системы. Установлено, что трехмассовая система является оптимальной для моделирования процессов безредукторной лифтовой лебедки, так как увеличение числа масс привело бы чрезмерному усложнению математического описания.

В третьей главе было выбрано основное оборудование для практической реализации безредукторного электропривода лифта на основе тихоходного асинхронного двигателя с параметрами согласно заданию. Был выбран тихоходный асинхронный двигатель 5AF225M8, преобразователь частоты фирмы «ЭлеСи» ESD-TCL и безредукторная лебедка фирмы «РУСЭЛПРОМ».

В четвертой главе было проведено имитационное моделирование в прикладном пакете программ Simulink MATLAB 2014b. Исследована модель тихоходного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат при прямом пуске. В результате чего был сделан вывод, что созданная модель является адекватной и пригодна для дальнейших исследований.

Создана система автоматического управления тихоходным асинхронным двигателем на основе векторного управления с датчиком

скорости, включающая в себя четыре контура регулирования: 2 контура по току, по скорости и по потокосцеплению. Для обеспечения плавного пуска и остановки применен S-образный задатчик интенсивности скорости. По результатам переходных процессов установлено, что модель является пригодной для использования в лифтовой установке, время разгона двигателя с положения покоя до номинальной скорости составляет 2,7с; Время остановки, включающее в себя движение на пониженной скорости для точной остановки, составляет 4с.

Далее было проведено исследование разработанной модели электропривода с нагрузкой в виде безредукторной лебедки. По результатам моделирования переходных процессов скорости и момента можно сделать вывод, что нагрузка в виде безредукторной лебедки является меньшей, чем номинальный момент двигателя. В результате чего двигатель работает не на полную мощность. Однако, взяв во внимание то, что кабина лифта редко бывает полностью загружена, то следует вывод, что лифтовой электропривод чаще всего работает при нагрузке 30%-60%. Отсюда напрашивается вывод, что в проектировании лифтовых установок с векторным управлением целесообразно использовать адаптивное формирование потокосцепления от функции момента на валу двигателя. Это позволило бы существенно снизить энергопотребление электропривода пассажирского лифта.

В конечном результате был спроектирован регулируемый электропривод по системе ПЧ-АД на основе безредукторной лебедки, отвечающий всем требованиям задания и нормам ПУБЭЛ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2435283. Голембиовский М.И., Захаров А.В., Кобелев А.С., Кругликов О.В. «Безредукторный привод лифтовой лебедки».
2. Патент № 2359900. Едиханов Т.Ф., Новиков В.А. «Привод лифта».
3. Патент № 2278812. Виттур Хорст, Кюнчер Дитмар. «Безредукторный лифт с тросовым приводом».
4. Патент №2075814. Каган А.В. «Асинхронный двигатель для низкоскоростного безредукторного электропривода».
5. Патент №2233785. Добробаба Ю.П., Сафронович А.И. «Способ поэтапного управления электроприводом лифта с учетом влияния упругостей тросов».
6. Архангельский Г.Г. Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения / Г.Г.Архангельский // Стройпрофиль. - 2008. - №7. - С.94-96.
7. Автоматическая система управления приводом лифтов – [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.kazedu.kz/referat/94626#2>
8. Афонин В. И. К вопросу о безредукторных приводах лифтов/ В. И.Афонин // Лифт.- 2009.-№6. - С.53-57.
9. Дауковский Л.Х. Электропривод шахтных подъемных машин / Л.Х. Дауковский, В.И. Роговой, И.С. Кузнецов, И.А. Кузьмина, П.Т. Вайнштейн, А.В. Бирюков // Электротехника : журнал. 2010. - №1. - С. 25 -42
- 10.Афонин В.И. Моделирование работы безредукторного лифтового привода/ В.И.Афонин, Р.В Родионов // Лифт.- 2009.- №2.- С.42-46.
11. ГОСТ 22011-95. Лифты пассажирские и грузовые. Технические условия. Введ. 1997 - 01 - 01. - Минск : Изд-во стандартов, 1995. - (Межгосударственные стандарты).
- 12.Афонин В.И. Математическое моделирование режимов работы асинхронных двигателей безредукторного привода лифта/ В.И.Афонин, Р.В.Родионов// Четвертая международная научно-техническая

- конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Доклады, УрФУ Екатеринбург.- март 2011
13. Клевцов А.В. К вопросу о выборе преобразователей частоты для электропривода переменного тока / А.В. Клевцов // Электро : журнал. 2002. -№3. - С. 32-35.
 - 14.Ланграф С.В. Асинхронный моментный электропривод с векторным управлением для имитационных усилий запорной арматуры магистральных нефтепроводов / С.В. Ланграф // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2007. - С. 20
 15. Масандилов Л.Б. Особенности определения параметров асинхронного двигателя при частотном управлении / Л.Б.
 16. Масандилов, С.Е. Новиков, Н.М. Кураев // Вестник МЭИ : журнал. М. : Издательский дом Мое. энерг. ин-та, 2011. - №2. - С. 54 - 60.
 17. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебное пособие / В.В. Москаленко. М. : Изд-во Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
 18. Мощинский Ю.А. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали / Ю.А. Мощинский, Аунг Вин Тут // Электричество : журнал. 2007. - №11. - С. 60 -66.
 - 19.Преобразователи частоты ЭЛЕСИ – [Электронный ресурс] – режим доступа:<http://elesy.ru/products/products/esd-tcl/advantages.aspx>
 20. Тургенев Д.В. Анализ трехмассовой механической системы для безредукторного привода лифтовой лебедки / Д.В. Тургенев
 21. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.В.Копылов. - М.: Изд-во Высшая школа, 2001. – 274
 22. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

23. Бесекерский В.А., Попов Е.В. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752с.
24. Гарганеев А.Г., Ланграф С.В. Стенд для нагрузочных испытаний электроприводов. Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и силовая электроника» (АЭПЭ-2006), Новокузнецк 2006.
25. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
26. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока/ Пер. с нем. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.
27. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 274 с.
28. Ланграф С.В. Косвенное определение момента в асинхронном электроприводе. Труды X-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск 2004г.
29. Ланграф С.В. Оптимизация систем векторного управления асинхронных электроприводов. Материалы XII-ой Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2006), Изд-во ТПУ, 2006, С. 68-70..
30. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. -144.
31. Каталог безредукторных лебедок «РУСЭЛПРОМ» – [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://jalil.uz/images/doc/Ruselprom11.pdf>
32. Чернышев А.Ю., Ланграф С.В., Чернышев И.А. Исследование систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем: методические указания к выполнению лабораторных и практических работ по курсу "Электропривод переменного тока" для студентов специальности

180400. Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 23 с.
33. Кругликов О.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Асинхронные частотно-регулируемые электродвигатели для привода безредукторных лифтовых лебедок» г.Москва.
34. Тургенев Д.В. Особенности механики лифтов с безредукторным приводом лебедки / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии 2009». Сборник трудов - Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2009.- С.236-240.
35. Тургенев Д.В. Современное состояние приводов лифтов / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011». Сборник научных трудов SWorld.- Одесса : Черноморье, 2011.- Вып. 4, т.9. - 411- 0414.- С.40-43.
36. Тургенев Д.В. Анализ трехмассовой механической системы для безредукторного привода лифтовой лебедки / Д.В. Тургенев // Электротехнические комплексы и системы управления.- 2012.- № 1(25). – С. 59-63.
37. Тургенев Д.В. Модифицированная система управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки. Диссертация на соискание степени канд. техн. наук.- Томск, 2012.- 129с.
38. Галкин А.А. особенности механических параметров безредукторных лебедок лифта с низкоскоростными асинхронными двигателями / А.А.Галкин // Электропривод.- Вып. 685.- С.67-72.
39. Галкин А.А. Исследование безредукторного электропривода лифта с низкоскоростным асинхронным двигателем. Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. Москва, 2012.- 142с.

40. ГОСТ 22011-95. Международный стандарт. Лифты пассажирские и грузовые. Технические условия.- Введ. 1997- 01- 01. - М.: Изд-во стандартов, 1996.- 29с.
41. ГОСТ Р 53780-2010. Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке.- Введ. 2010-10-14. - 75с.
42. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
43. Фатхудинов Р. А. Производственный менеджмент. 203 – 491с.:ил, 4-е издание.
44. Крепша Н.В., Свиридов Ю.В. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. – метод. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 145 с.
45. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
46. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
47. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
48. Федосова В.Д. расчет искусственного освещения: Методич. указания. – Томск: Изд – во ТПУ, 1991. – 23 с.
49. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
50. ГОСТ 12.1.012-90. Вибрационная безопасность.
51. ГОСТ 12.1.009-76. ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения.
52. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
53. Правила электроустановок ПУЭ.
54. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. / М.: Высшая школа, 1991. – 128с.

55. Как утилизировать бытовую технику и электронику – [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.ecorb.ru/70>.
56. ГОСТ 12.1.010 – 76. Основы противопожарной защиты предприятий.
57. Эргономика рабочего места пользователя ПЭВМ – [Электронный ресурс]- режим доступа: http://bgd.alpud.ru/private/glava4/V_4_A_gigienan.htm.
58. "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

ПРИЛОЖЕНИЕ А

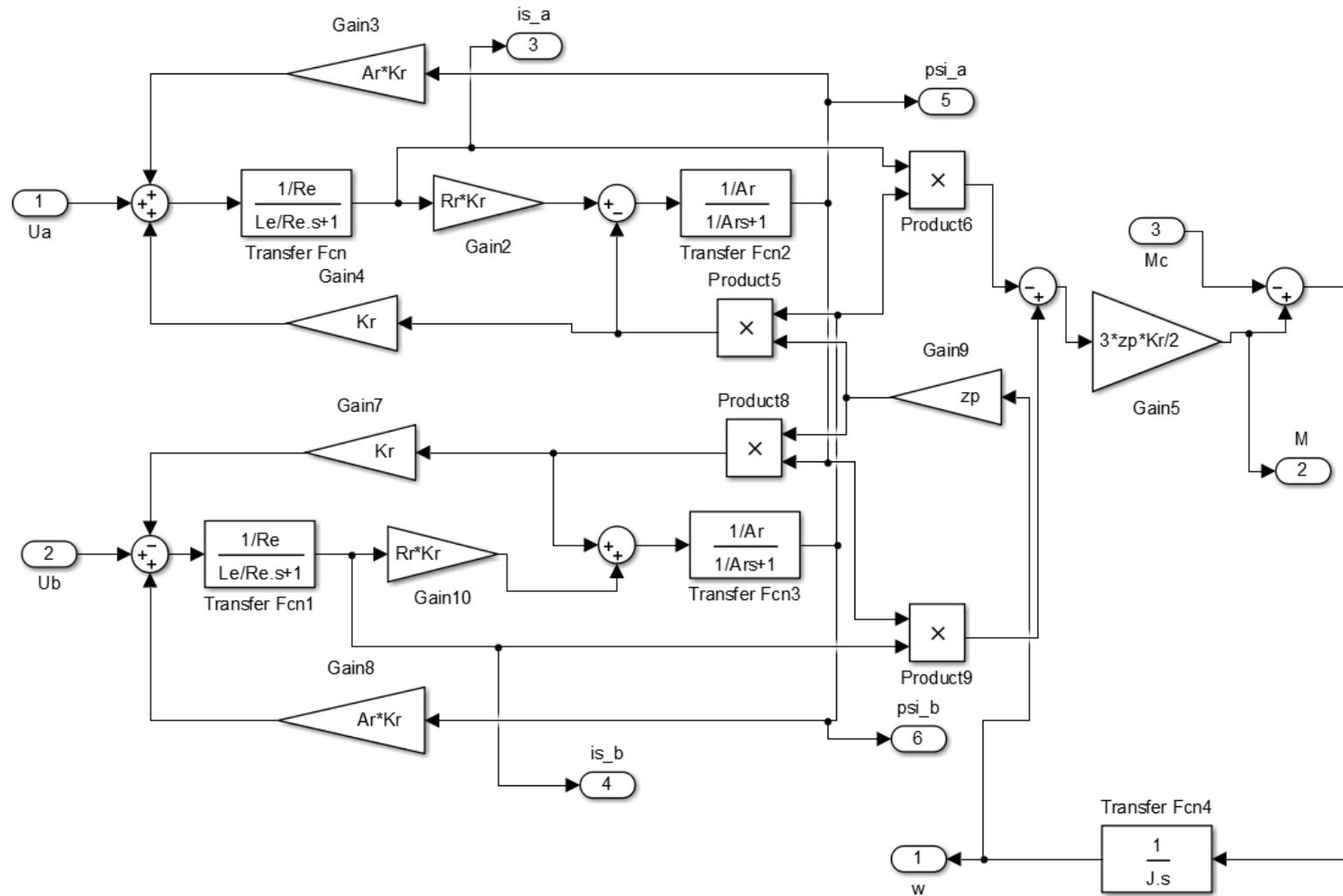


Рисунок А.1. Имитационная модель в среде Simulink-MATLAB для исследования переходных процессов прямого пуска модели тихоходного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

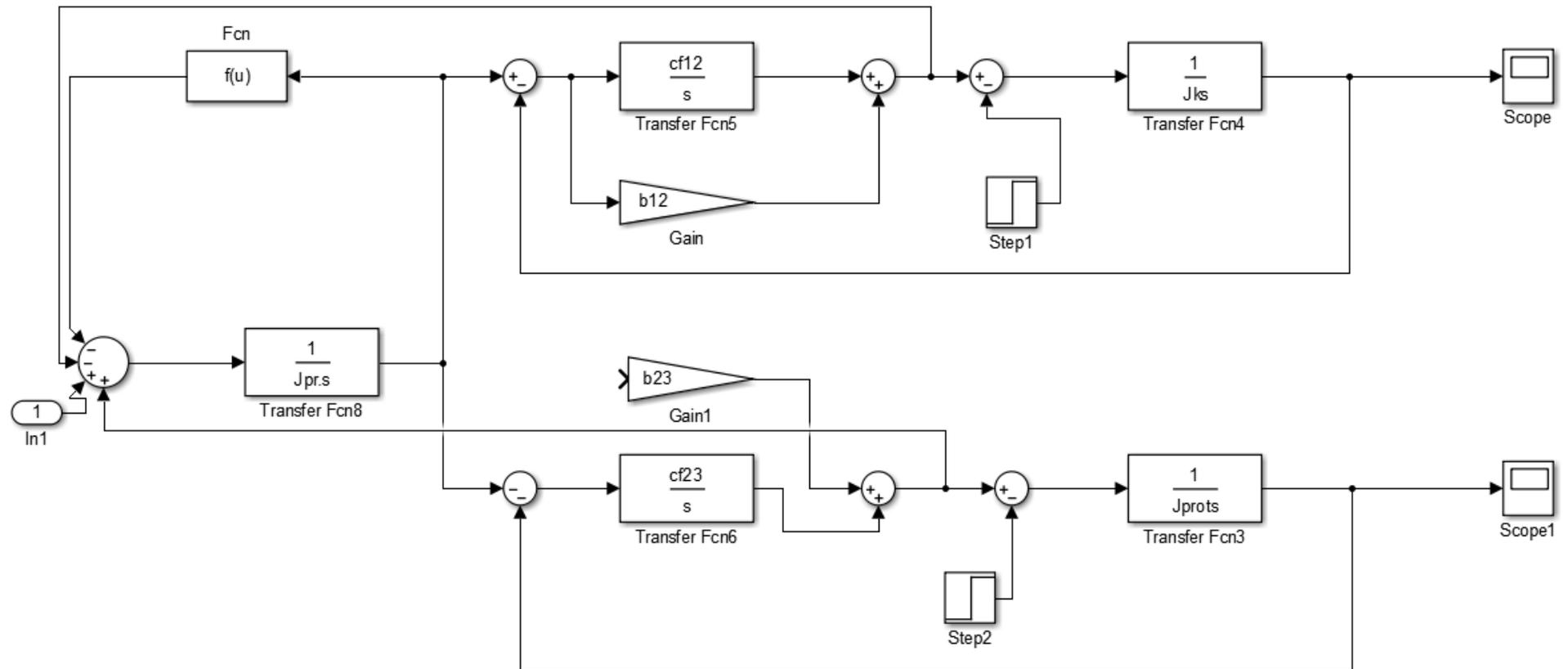


Рисунок Б.1. Имитационная модель механической части безредукторной лифтовой лебедки в среде Simulink-MATLAB

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

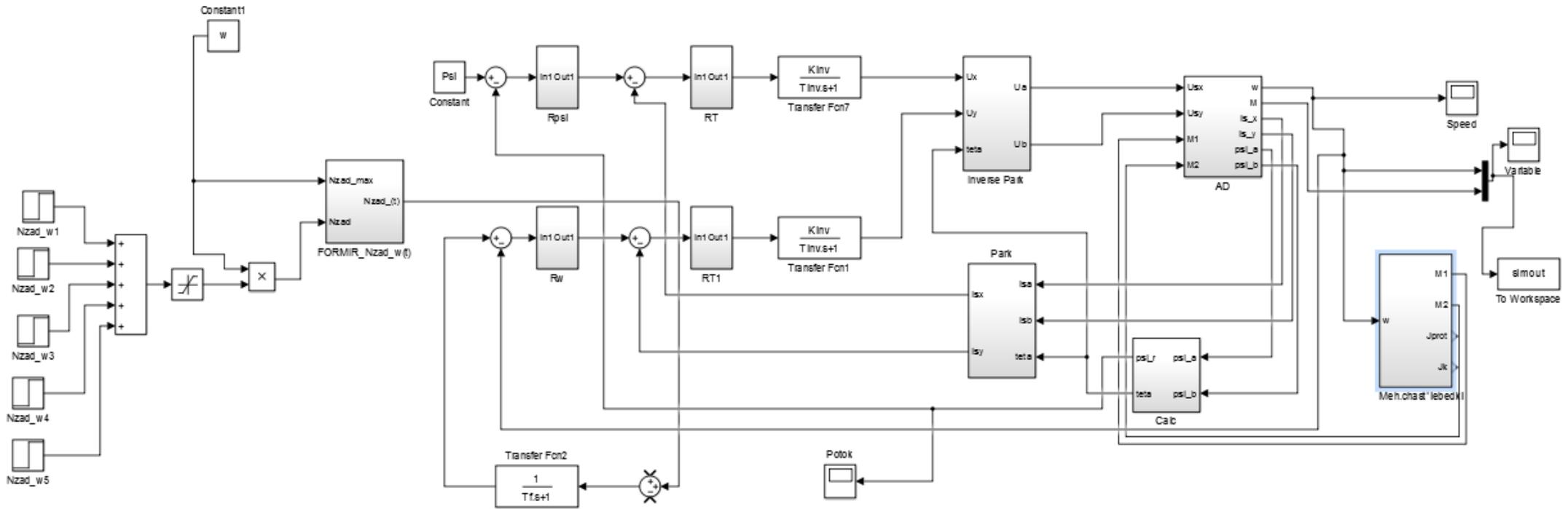


Рисунок Г.1. Имитационная модель в среде Simulink-MATLAB регулируемого электропривода на основе тихоходного асинхронного двигателя с векторным управлением и учетом нагрузки в виде имитационной модели безредукторной лифтовой лебедки

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д.1 - Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнитель работ	Раб.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль		Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	1	—													
		Инженер	1	—													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	8	—	—												
3	Изучение патентной базы	Инженер	10		—	—											
4	Литературный обзор	Инженер	20			—	—	—									
5	Анализ требований к лифтовому оборудованию	Инженер	2					—									
6	Математическое описание ТАД	Инженер	5					—	—								
7	Математическое описание механической части	Инженер	10						—	—							
8	Система относительных единиц	Инженер	5							—	—						
9	Имитационное моделирование ЭП лифта	Инженер	10								—	—					
10	Формирование текущих результатов в статью	Инженер	2									—	—				
11	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	6											—			
		Научный руководитель	6											—			
12	Составление пояснительной записки	Инженер	12											—	—		
13	Проверка магистерской диссертации руководителем	Научный руководитель	2												—		
		Инженер	2												—		
14	Исправление ошибок	Инженер	2												—		
15	Подготовка к защите магистерской диссертации	Инженер	5												—		

Приложение Е

Раздел (7) Overview of elevator equipment

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Палванов Роман Бахтиярович		

Консультант кафедры ЭПЭО _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Краснов И.Ю.	К.Т.Н		

Консультант – лингвист кафедры иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Пташкин А.С.	к.ф.н		

INTRODUCTION

Elevator is a specific vehicle ment to transport people and cargo. Long interstorey conveyance in tall buildings and deep mines With the help of elevators became possible. It is a distinction of elevator from any other vehicles that any passenger inside may operate it. This is possible due to development of automation.

Elevator is considered to be a complex of electromechanical equipment, thus its constructional design is an object of stringent requirements provided by Rules of installation and safe operation of elevators. From the beginning of installation and until the end of elevator usage, it is crucial to meet the requirements of the Rules to ensure passengers' safety.

There are two types of elevators: the electric and the hydraulic ones. The most commonly used type is naturally electric one, due to its reliability and maintenance simplicity.

The basis of an elevator is its lifting mechanism called motor drive.

This paper considers the currently existing elevator systems and development perspectives. As a result, a controllable electric motor drive is designed to be used in a gearless elevator.

1. LITERATURE SYRVEY

1.1. Types of elevator units

Elevators are found to be useful in many aspects of human life, yet they aren't universal vehicles, thus have to be classified accordingly.

Elevator units classification: by the purpose intended: passenger-carrying is designed only to carry people; cargo-and-passenger is used to transport both people and cargo; bed elevators specialize in transporting patients; cargo-only is used to move cargo; purpose-built (nonstandard) elevators are engineered to meet specific needs and requirements; by motor drive modifications: electric drives for AC or DC grid; hydraulic drive is made as a hydraulic cylinder or a rotary type hydraulic motor; by movement transmitting mechanism: rope elevator transports its lift cabin with the help of hauling cables; chain drive, spline and screw types move cabins with haulage chains; by means of movement transmission from traction unit to haulage cables: winding elevators; traction sheave elevators; by means of ropes action on cabin: upper mounted ropes; ram elevators with ropes mounted over the bottom of a cabin.; by rope reeving scheme: elevators with direct polyspast cabin mounting; elevators with rope multiplier; by machine room layout: upper position machine room; lower position machine room; by hauler design modification: gear drive; gearless drive; by cabin speed: low-speed – cabin (movement speed is up to 1 m/s); high-speed cabin (speed is 1.4 – 2 m/s); express elevator (speed \geq m/s); by cabin stop precision: with precise stop system; without precise stop system.

Major characteristics of an elevator are as follows: carrying capacity; speed; rise.

By carrying capacity, maximum mass inside the cabin is implied.

The capacity of a cabin is assessed the following way:

$$E = \frac{Q}{Q_p}, \quad (\text{E.1.1.1})$$

where Q is the expected carrying capacity, kg;

Q_p is the average mass of a single passenger. Usually it is taken in 80 kg.

The stopping speed is the speed allowing maximum precision stop.

The revision speed is the speed used by maintenance personnel. If the speed is less than 0,7 m/s, the revision may be done at nominal speed.

The limit speed is the speed of elevator car safeties triggering.

The rise is assessed in accordance with building structure, but it still has a limitation of building useful volume loss.

The operation rate of elevator is one of the most important parameters. It depends on building tallness, elevator carrying capacity, switching intensity, etc.

1.2. Design and function

The inherent parts of an elevator are: cabin, balance, electric drive, speed limiter, hauling ropes, cabin guideways, electric equipment.

The inherent parameters to begin with are as follows:

$M = 400$ kg is the carrying capacity;

$M_{bal}=1000$ kg is the balance mass;

$M_{cab}=800$ kg is the empty cabin mass;

$V=1$ m/s is the normal movement speed of cabin;

Kinematic scheme description (Fig.. E.1).

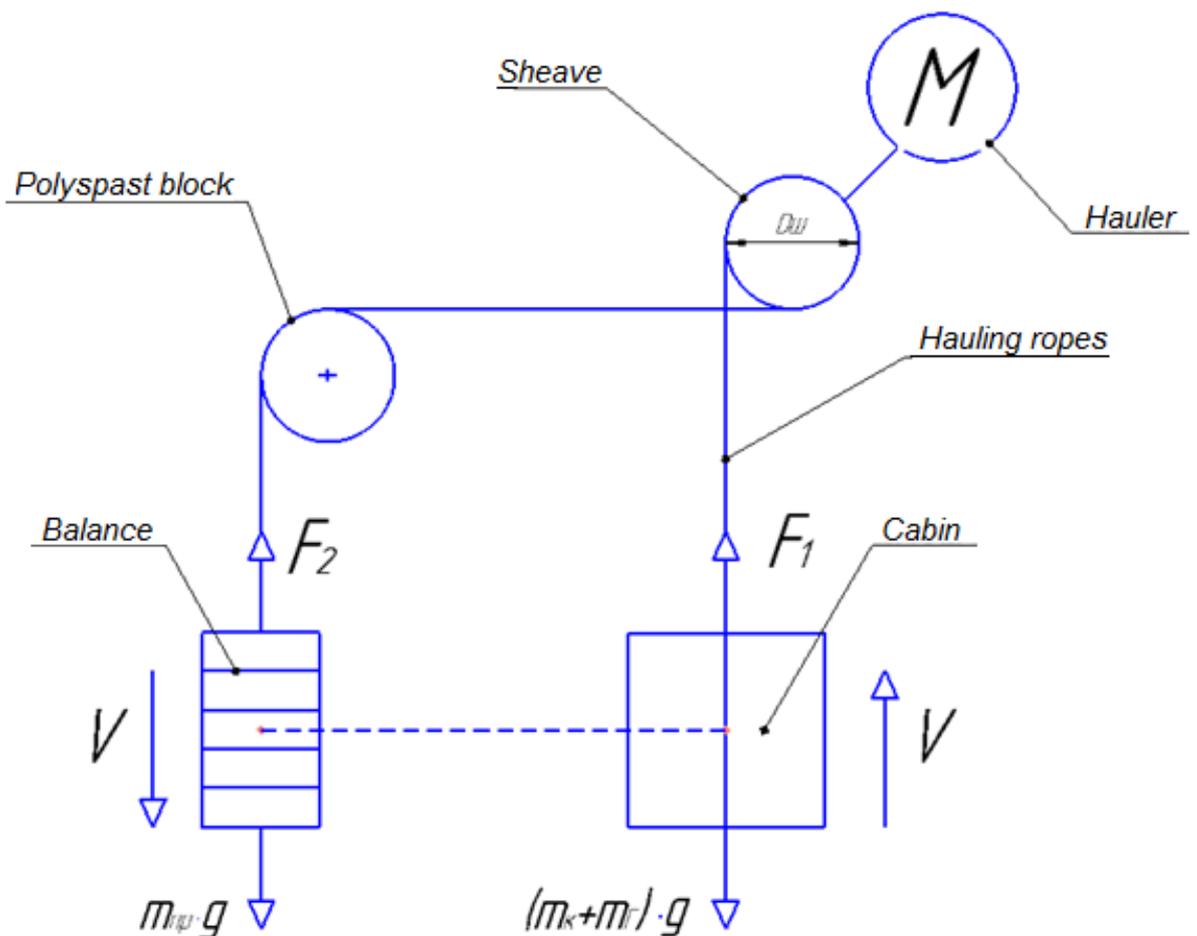


Figure E.1 – The kinematic scheme of elevator

The hauling ropes from sheave envelop polypast block on the cabin and the cabin and the balance are mounted to the upper flooring inside the shaft.

With the help of elevator hauler the movement of cabin and balance is performed by the hauling ropes. Also there are a deceleration device and a control station in the machine room.

The elevator car controls is available to any passenger. Pressing the elevator call button sends a signal to the control station. The controller having received this signal forms a task: if the cabins are on the same floor as the control panel, from which the signal comes, an opening occurs; if the cabin is on another floor, a signal to move is sent. If the cabin moves while receiving a command, the task is formed accordingly to the movement direction. If the elevator moves the same direction, it

stops by to pick up new cargo. Otherwise, the signal is saved to be sent on the way back.

To maintain a precise stop of the cabin and for the sake of passengers' comfort the actuators are used. These actuators are placed on a certain distance from the floor depending on the cabin operating speed. A signal from the actuator switches the drive to the lower frequency. Then a stop command is sent. At the moment of elevator car being on the floor level the brake activates and the doors open.

In our case the gearless hauler drive with a frequency transformer completely excludes stepped acceleration or deceleration because of the wide speed adjustment range.

Elevators are treated as equipment with high safety requirements. To exclude the case of doors being locked down while passengers are inside, sudden stops out of the floor, etc, the cabin movement is possible only if all the systems are intact. If any fault occurs, the elevator is not allowed to move, due to the control circuit being broken by interlocks. The only one button that works is "Communicate executive"

The main part of an elevator is its lifting (hauling) drive. Passengers are transported inside an elevator car equipped with automated doors and actuators excluding movement while the doors are open.

To center the cabin and the balance on level and to exclude traverse rocking while moving, guideways are used along the shaft. The guideways make it possible to stop the cabin or the balance with the help of elevator car safeties in case of speed limit being exceeded.

The space in which the cabin moves is called a shaft.

The room where the hauler and other equipment are installed is named a machine room.

The lowest shaft part is lower than the lowest floor. There a limit screw or a buffer is placed to limit the cabin or the balance movement.

To prevent cabin or balance falling down the shaft the elevator is equipped with automated safety.

The elevator car safeties installed on both left and right sides of the frame and are activated by speed limiter and moved by a rope wrapping over the speed limiter sheave.

In the areaway of the shaft a jacking device is installed.

A control station operating the elevator and apparatus are placed in the machine room. The station is linked to electric equipment in the elevator car with the help of an overhead cable and a bunch of wires mounted in the shaft. Deceleration picking up units, bypass and shaft door controls are also installed inside the shaft.

An elevator equipment placement sheet is shown in Fig. E.2. The hauler and the control cabinet take place in the machine room restricted to unauthorized persons.

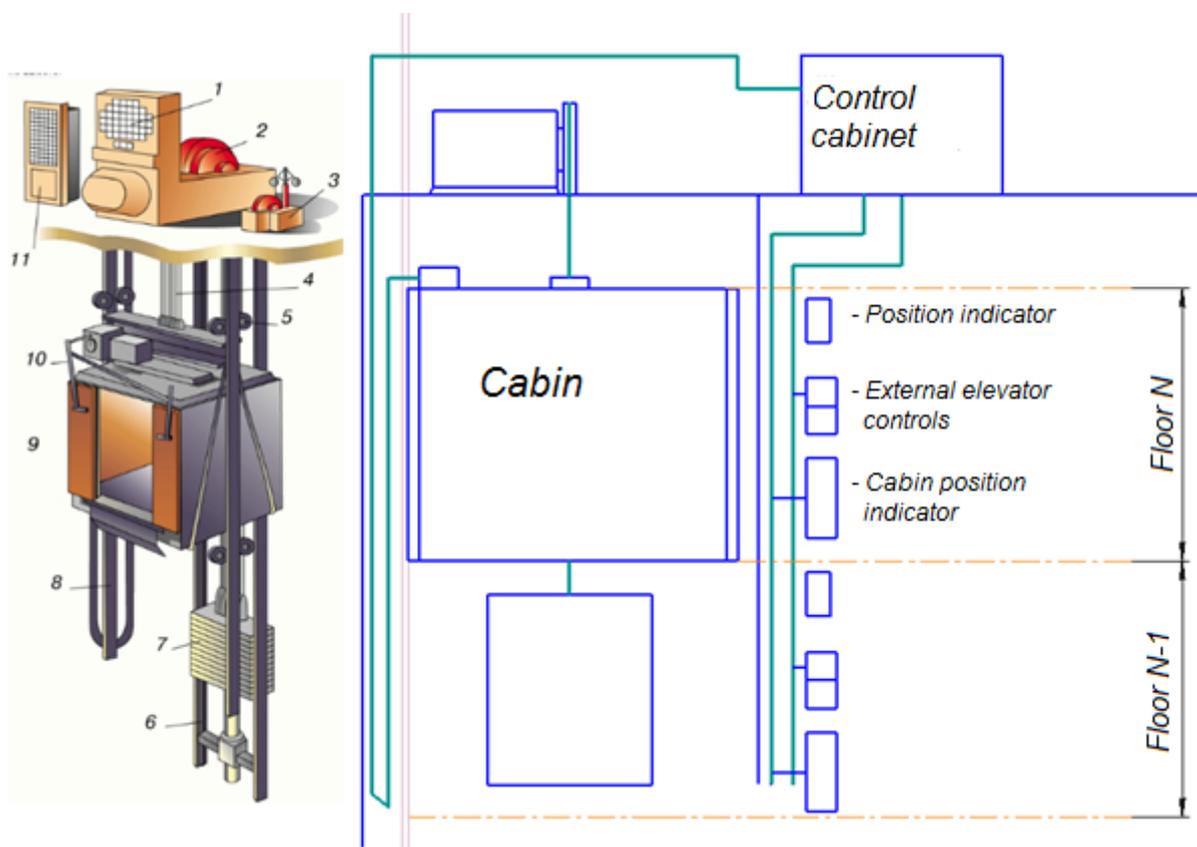


Figure E.2 – Elevator equipment technological plot

The main control board is installed inside the control cabinet. Sequential transmission line is divided into cabin channels and shaft channels. The cabin channel is an overhead cable connected to a joint box. The following is labeled in Fig. Г. 2. : 1 is the elevator control computer; 2 is the motor; 3 is the executive control system; 4 is the set of hauler ropes; 5 are the guideway wheels; 6 is the balance guideway ; 7 is the balance; 8 are the cabin guideway rails; 9 is the cabin; 10 is the door opening mechanism; 11 is the floor data storage.

1.3. List of technological variables, actuators. Assessment of measurement accuracy.

Insofar as the hauler electric drive is the main component of elevator equipment, almost all the below listed variables depend on it:

- Car weight is constantly changing in accordance with the passenger count, thus changing drive torque;
- Elevator car position in the shaft, sheave tilting angle; Current and voltage variables are transduced into machine drive controls.
- The elevator car speed; Скорость передвижения лифтовой кабины.

Consequently, to make manipulations over the elevator car precise, the listed variables are essential.

The control is carried out in a few stages. A frequency transformer is used to operate the elevator hauler drive with the help of vectorial control over the induction motor, thus allowing motor speed to be altered in a wide range for the sake of smooth acceleration/deceleration. The operation itself may run with the help of a frequency transformer alone, but such a system is unreliable and thus it is not used in elevator units. The operation task for the drive is compiled by a microcontroller or by servocontroller of custom modification, which in turn communicates with an operator station. In particular the controller, provided the actuator signals are

available, forms the best move command for the main electric drive and door drive. Information about accidents and failures is immediately sent to the operator station.

1.4. Major processing controls requirements definition. Quality criterion stating.

The main purpose of elevator car controls is to make sure positioning is comfortable and accurate. The basic quality criteria are: Основные критерии качества:

- Movement smoothness. According to the Rules mentioned above, to ensure comfortable people transfer the cabin acceleration is 2 m/s^2 max.

- The impact on human body depends on the duration of acceleration.

Human body reasonably bears $30\text{--}40 \text{ m/s}^2$ acceleration if duration is less than 0.4 s. Therefore, a short intense acceleration is acceptable.

Elevator accessibility is defined not only by the acceleration, but also by other factors. These items are considered below:

The elevator hold time is the time a passenger has to wait in place. It is reasonable to include increased movement speed of a car if it is empty in case of a tall building. In this case the building is not tall, thus normal movement speed is selected.

Smoothness and precision of stop is provided with the help of precise stop actuators. At reaching the destination floor a deceleration signal is formed. As long as the gearless drive is operated by vectorial controls with the help of a frequency transformer, smooth movement availability is no challenge.

Noise present while moving is also an accessibility factor. Gearless drive compared to geared one possesses an advantage of being much less noisy.

1.5. General electric drive requirements

As the electric drive is the main unit of the elevator equipment, it is imperative to state general requirements asserted to the elevator being developed. The requirements are as follows: Reliability, safety; Noiseless; Exploitation simplicity; Elevator car acceleration limitation; Movement smoothness; Revision speed presence ($V_{rev} \leq 0.36$ m/s); Positioning precision;

1.6. Elevator haulers

Elevator hauler is a mechanism used to gear the elevator car. Quality and safety are regulated by The Rules of installation and safe operation of elevators.

The guidelines are as follows:

- The hauler and its components must bear the maximum stress met during the exploitation period.
- Winding drum haulers and star geared haulers are allowed at speed up to 0.63 m/s.

Balance is forbidden to use in junction with these types of haulers.

- The brake pulley must be connected kinematically to the traction unit.
- The hauler is equipped with a claw flange to make cabin movement possible in case of a power cut;
- Demountable or stationary modifications of shifter are allowed;
- The shifter must have a marking to identify its affiliation with a certain hauler.
- The cabin movement direction, provided the shifter is turned, must be marked on the hauler;
- The machine room must have the elevator car position controls.

The most commonly used drive type for elevators is the induction motor drive. The induction motors are considered the most reliable and with advent of frequency transformers the induction motor-based drives have advanced in rotary speed adjustment. Frequency and vector control makes wide adjustment range

possible. Considering all these advantages, induction motor based drives gradually edged out dc drives. An induction motor rolls over only for synchronous motors in terms of properties, but this type of drive has started its development recently, so it might take a while for the synchronous motors to take a stand.

Rotary hydraulic drives are used strictly in buildings with low number of storeys. Hydraulic type of motors has not developed enough in Russian elevator engineering

There are a few variations of traction unit: a winding drum hauler (Fig. E3, a), a hauler with a traction sheave and a star geared hauler. Usually, a traction sheave is selected as a traction unit due to the reasons considered below. Haulers differ in terms of kinematic link to the motor in a following way: geared haulers whose rotation is maintained through a gear and gearless haulers, which on the contrary have no gear (Fig. E.3,б). Gear is a mechanism which transforms motion while altering rotation speed and torque.

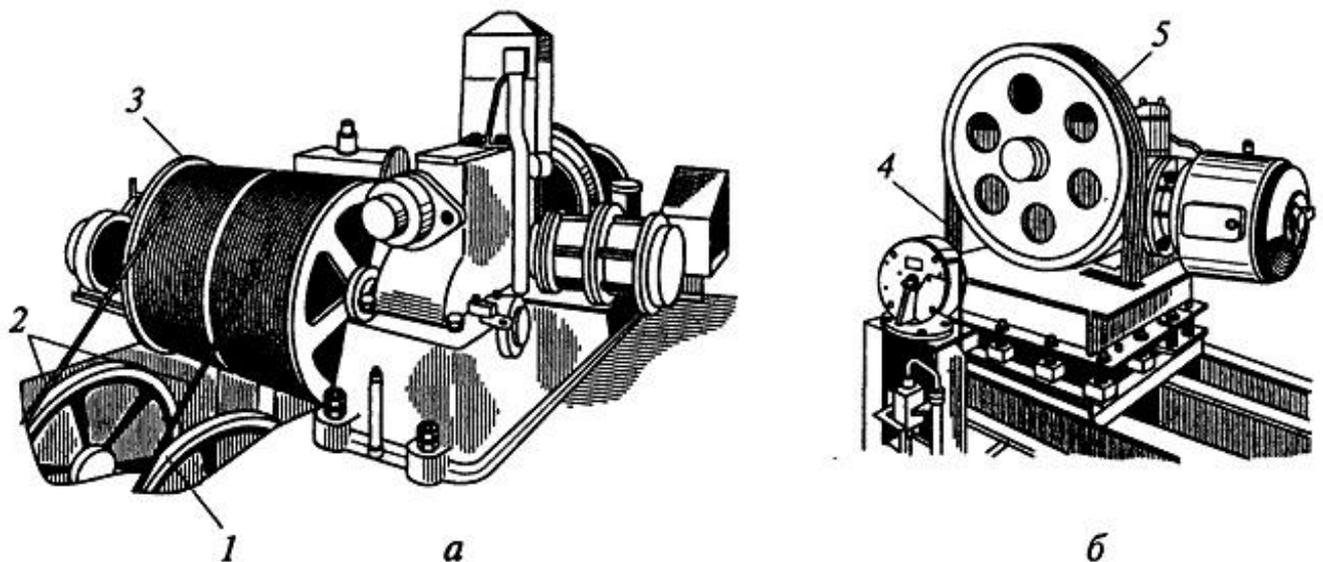


Figure E.3 – Hauler types: a is the drum winding hauler; б is the hauler with a traction sheave equipped; 1 is the angle pulley; 2, 4 are the ropes; 3 is the drum; 5 is the traction sheave

Gearless haulers (Fig. E.4) are used in express elevators or to provide extra accessibility. Traction sheave and brake pulley are mounted to a slow motor shaft.

For the sake of gearless drive exploitation and smooth movement speed adjustment, frequency transformers are put to use. In Russia passenger type elevators with the speed of car up to 4 m/s are manufactured.

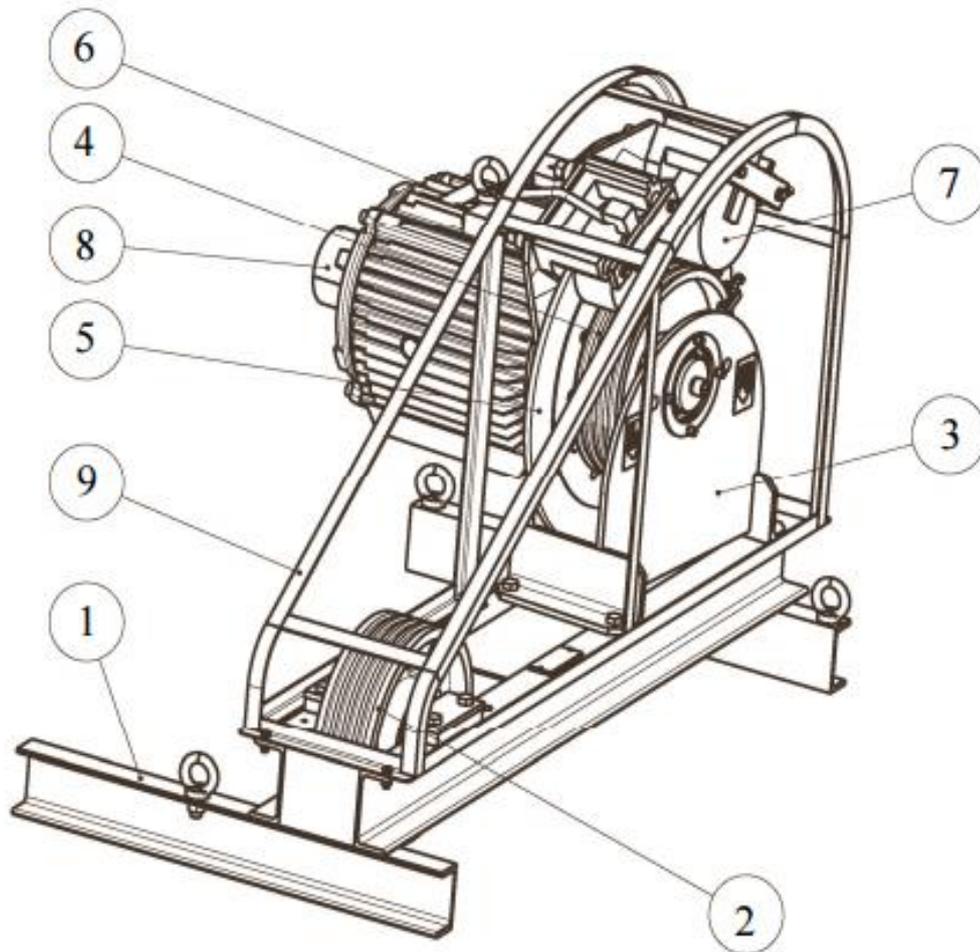


Figure E.4 – Gearless hauler combined with a slow induction motor:

1 is the frame; 2 is the angle pulley; 3 is the drive sustainer; 4 is the traction sheave; 5 is the brake disk plate; 6 is the electric motor; 7 is the electromagnetic brake; 8 is the speed feedback actuator encoder; 9 is the frequency transformer and brake resistors box

1.7. Slow speed induction motors

At the present day most of the elevator drives consist of dual speed induction short-circuit winding motor, gear, brake and relay contact controls.

The most notable issue with the relay contact control system lies in its reliability and off-tuning which leads to high inrushes at start. As for the mechanical

part of the system, its stiff mechanical characteristics and high dynamic torques arise from the same imperfect control system.

Due to semiconductor electronics and microprocessors developing rapidly the variable frequency drives became handy and profitable. Therefore, such scheme as frequency transformer – induction motor became a transition tendency for gearless drives. The major advantages of gearless drive are:

- Gear eliminating, which means mechanical losses, size and weight decrease.
- High comfort transportation due to the increase of start and stop smoothness.
- Low noise and vibration levels, thanks to gear nonexistence.
- The most efficient gearless electric drive development direction is implementation of low-speed high-torque induction motor.

Low-speed based drive differs from convenient ones in terms of low normal rotation speed (50 – 300 rpm), considerably higher torque, low voltage frequency and inrushes up to 2-3 times decreased.

Besides, microprocessor based digital system utilization in slow induction motor controls gives an opportunity to implement flexible operation algorithms and provides all the necessary properties of the drive, such as positioning precision and elevator accessibility.

1.7.1. Slow speed induction motor analysis

As mentioned before, it is extremely ineffective to utilize general purpose industrial grade motors to achieve high torque at low speed. To solve this issue a purpose built motor different from serial ones is to be developed.

One of the main distinctions of low-speed operation (less than 5 – 10 Hz) is the electric loss amount in stator windings.

The mechanical loss and the core loss contribute a tiny part of the total loss, because of rotation speed being low, thus making the losses nonsense.

Therefore, the major requirement to steel is not specific loss, but a possibility for the magnetic system to act in case of heightened induction and minimum magnetizing current. This allows us to lower the electrical loss by means of current consumption decrease.

To increase overload capability of a motor, both active and reactive resistances in stator and rotor must decrease. In a rotor induction resistance X_R is achieved by means of slot depth decrease. Besides, the R_R and X_R decrease is

achieved by rotor slot count altering from $\frac{Z_R}{Z_S} \geq 1,2$. The stator poles quantity is selected, provided input frequency is not less than 4 Hz. Stator slot structure should meet an optimal combination of slot-leakage conductivity and main flux conductivity to maximize torque. A slot should be as wide as possible and preferably opened up. The slot quantity should guarantee q being not less than 2. The winding design should provide minimum end coil. It is achievable if double layer winding gets shortened, otherwise mush winding is used. The major relationships between stator and rotor slot quantities are listed in a sheet below for high-torque motors, powered by low-frequency inverter.

Table E.1 – Standard values for slot quantities

$2p$	Z_S	Z_R	q
6	54	66	3
6	72	86	4
8	72	86	3
8	96	114	4
10	60	74	2
10	90	108	3
12	72	86	2
12	108	130	3

Utilizing out-of-round rotor slots allows a dramatic decrease of inductive dissipation resistance to take place, due to slot opening up to 2.2 mm. Combined with implementation of abovelisted standard slot ratio values it improves maximum torque and overload capability of a motor consequently. The last statement is particularly true for elevator motors to start, as they possess considerable inertia. Because of slot skewing nonexistence, the additive ultraharmonic losses and X_R values decrease, provided the rotor slot count is higher than that of the stator one. To tell the truth, not only motoring, but also generator mode benefits from it with the corresponding output performance and overload capability improvements.

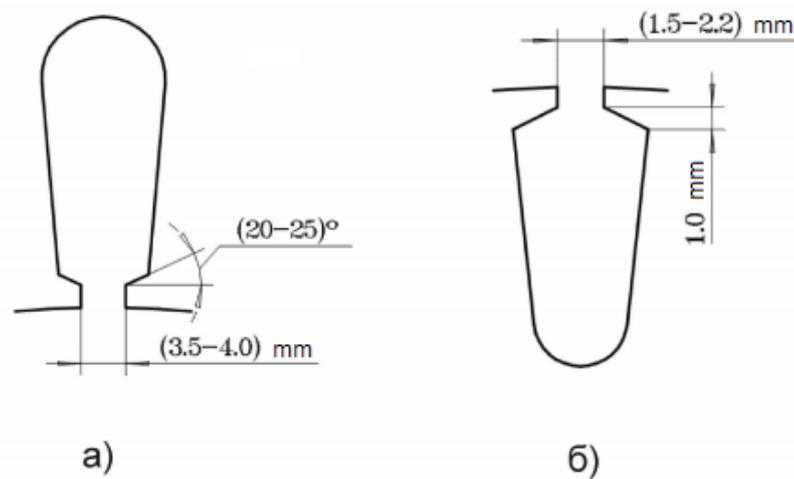


Figure E.5 – Slot configuration: a) stator slot; b) rotor slot

A stator slot configuration is shown in Fig. E.5. The design of open slot is aimed for induction dissipation resistance decrease. The slot smoothed off part, the arch component provides the magnetic system stiffness. Vibroacoustic properties improvement is particularly important to maximize the slot space factor, heatsink, to decrease active rotor resistance, active losses. That contributes for max torque of a motor. The whole complex of proposed measures is aimed at designing of an optimal and efficient motor powered by low-frequency inverter. Implementing a single engineering decision one does not get all the necessary parameters. Thus, the proposal is to be used as a set of measures.

1.8. Elevator frequency transformers

With the appearance of frequency transformers the development of motor drives has become significant. Due to inverters it is possible to adjust induction motor speed much more precisely than it used to be with other means of voltage control.

Utilizing frequency transformers one contributes positively for current inrushes, for precision of movement. As the whole elevator car movement system improves, mechanical components, such as hauler cables, guideways, balance chassis, etc. age slower. Yet the most essential for us is gearless hauler drive availability in junction with a slow induction or a synchronous motor.

It is inefficient to utilize general purpose industrial grade frequency transformers, due to the elevator controls being complex.

A few additional requirements for elevator-purposed frequency transformers are listed below:

- Nominal torque as drive starts and dynamic properties improvement with the help of vectorial controls over the induction motor.
- Multifunctionality, operation with either the induction or a synchronous motor suitable for gearless hauler drive;
- An S-shaped set point intensity adjuster is a must to ensure smooth acceleration and deceleration.
- The frequency transformer interface and software should take in account the operation distinctive features: brake controls, servocontroller cooperation;
- Emergency elevator car dragging to the nearest floor must be present with all the associated actuators and safeties;
- Reserved power source should be available to switch to in case of emergency or a power cut from the main grid.
- Enhanced reliability;
- Recuperation mode should be available while decelerating.

- The inverter unit should meet the standards of electromagnetic comparability, stated to elevator drives used in residential buildings.

The demand for multifunctionality comes from gearless frequency-controlled drives abundance. Gearless drives find their use in express or comfort-oriented elevators in tall buildings and buildings having no machine room. By eliminating gear from the mechanical part of the drive, one may improve weight-size parameters of the unit and simplify its maintenance.

Considering all abovementioned requirements, only the synchronous and slow induction motor-based drives became widespread and common. This is mostly because of gearless hauler requires a motor possessing low nominal rotary speed.

REFERENCES

1. Appunn R., Schmulling B., Hameyer K. Electromagnetic Guiding of Vertical Transportation Vehicles : Experimental Evaluation // IEEE translations on Industrial Electronics. 2010. - V.57. - №1. - P. 335 - 343.
2. Gearless machine for high-rise elevators PMR340. Schindler Company. -2004. p. 50 p.
3. Jong J., Hakala H. The Advantage of PMSM Elevator Technology in High-Rise Buildings // IAEE, Proceedings of Elevcon. 2000. - P. 284.
4. Komatsu Takanori, Daikoku Akihiro. Elevator Traction Machine Motors // Mitsubishi Advance. September 2003. - V.103.
5. Lüh P.B., Bo Xing, Shi-Chung Chang. Group Elevator Scheduling With Advance Information for Normal and Emergency Modes // IEEE translations on Automation and Engineering. 2008. - V.5 - №2. - P. 245 - 258.
6. Osama M., Abdul Azim O. Implementation and Performance Analysis an Elevator Electric Motor Drive System // MEPCON, 12th International Middle East Power System Conference. 2008. - P. 114-118.
7. Utgoff P.E., Connell M.E. Real-Time Combinatorial Optimization for Elevator Group Dispatching // IEEE translations on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. 2012. - V.42. - №1. - P. 130 - 146.

