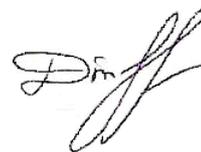


На правах рукописи



**Тургенев Дмитрий Викторович**

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ  
БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛИФТОВОЙ ЛЕБЕДКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические  
комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Дементьев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: Ещин Евгений Константинович,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Прикладных информационных  
технологий», ФГБОУ ВПО «Кузбасский  
государственный технический университет  
им. Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ)

Орлов Юрий Александрович  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Общая электротехника и  
автоматика», ФГБОУ ВПО «Томский  
государственный архитектурно-  
строительный университет» (ТГАСУ)

Ведущее предприятие: ООО «ЭлеТим», г. Томск

Защита состоится 29 мая 2012 года в 15:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.269.11 при Федеральном государственном  
бюджетном образовательном учреждении «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск,  
ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034,  
г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « 28 » апреля 2012 г.

И. о. ученого секретаря диссертационного  
совета, д.т.н., профессор



Качин  
Сергей Ильич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Лифтовые лебедки, как средства внутреннего транспорта, применяются на пассажирских, больничных и грузовых лифтах. Развитие жилого фонда и возрастающий парк подъемных механизмов требует совершенствования средств внутреннего транспорта зданий на основе современных научно-технических достижений.

Для механизмов подъема лифтовой лебедки существует проблема создания надежных, безопасных и простых в обслуживании электроприводов, удовлетворяющих всем техническим требованиям и обеспечивающих ограничение динамических нагрузок в электромеханической системе лифтовой лебедки.

В настоящее время большинство электроприводов лифтовых лебедок представляют собой конструкцию, состоящую из двухскоростного асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором, редуктора, тормозного устройства и релейно-контакторной схемы управления. Основной причиной выхода из строя электродвигателей в электроприводе подъема лифтовой лебедки является низкая надежность релейно-контакторной схемы управления, приводящая к ее расстройке и увеличению бросков токов при пуске асинхронного двигателя. Для механического оборудования главную опасность представляют высокие динамические моменты в электромеханической системе, возникающие вследствие несовершенства системы управления.

Благодаря существенным достижениям в развитии силовой и микропроцессорной техники и систем частотно-регулируемого электропривода переменного тока, во многих областях промышленности наметилась тенденция перехода к безредукторному электроприводе, выполненному по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель, лишенный присущих редукторным электроприводам недостатков. К основным преимуществам безредукторного электропривода, по сравнению с редукторным, относятся: отсутствие редуктора, более высокая комфортность лифта, меньший уровень шума и вибраций.

Одним из направлений развития безредукторных частотно-регулируемых электроприводов, в частности лифтовых лебедок, является применение в электроприводе лифта тихоходного асинхронного двигателя. Электропривод на его основе качественно отличается от электроприводов, применяемых в настоящее время, и существенно определяется особенностями работы тихоходного асинхронного двигателя в переходных процессах и выбранной структуре системы управления.

В настоящее время теоретические и практические вопросы разработки и исследования системы управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки, выполненного по системе преобразователь частоты - тихоходный асинхронный двигатель, представляют значительный научный и практический интерес, являются актуальной и своевременной задачей.

**Объектом исследования** является асинхронный безредукторный электропривод лифтовой лебедки.

**Предметом исследования** является система управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки.

**Целью диссертационной работы** разработка и исследование модифицированной системы управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки с переменной структурой на базе тихоходного асинхронного двигателя, обеспечивающей заданную точность позиционирования кабины в начале движения и полном останове и более высокую комфортабельность лифта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ современного состояния и направлений развития электроприводов подъемных механизмов лифтовых лебедок с точки зрения динамических свойств, работоспособности, экономичности и совместимости с релейно-контакторными схемами управления.

2. Исследовать силовой канал системы преобразователь частоты – тихоходный асинхронный двигатель, с целью формирования требований к системе управления электроприводом, специализированного преобразователя частоты, питающего тихоходный асинхронный двигатель для безредукторных лифтовых лебедок.

3. Разработать математическое описание и математическую модель механической части безредукторной лифтовой лебедки с учетом изменений моментов инерции и упругостей тросов;

4. Создать модифицированную систему управления безредукторной лифтовой лебедкой, учитывающую особенности электрической и механической частей системы преобразователь частоты – тихоходный асинхронный двигатель лифтовой лебедки;

5. Разработать методику настройки модифицированной системы векторного управления тихоходным асинхронным двигателем для программной реализации микроконтроллерного управления специализированным преобразователем частоты.

6. Разработать программное обеспечение, алгоритм управления инвертором напряжения специализированного преобразователя частоты для работы с тихоходным асинхронным двигателем, а также способ управления электроприводом лифтовой лебедки, повышающий точность позиционирования кабины в начале движения и полном останове.

7. Осуществить проверку разработанной системы управления электроприводом лифтовой лебедки на имитационной модели и экспериментальной установке.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались: теория электропривода и электрических машин, методы теории автоматического управления, численное и имитационное моделирование с использованием специализированных программ MathCAD и MATLAB (Simulink), программирование на языке C++, а также

экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях.

**Обоснованность и достоверность** полученных научных результатов и выводов подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых решений и адекватностью используемой при исследовании математической модели, применением среды моделирования MATLAB-Simulink, проверкой результатов на экспериментальной установке и действующей лифтовой лебедке, качественным и количественным сопоставлением результатов имитационного моделирования и экспериментальными данными.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработано математическое описание механической части безредукторной лифтовой лебедки, как трехмассовой системы, отличающееся от известных учетом изменяющихся моментов инерций и упругостей тросов, которые существенно влияют на динамические процессы безредукторного электропривода лифтовой лебедки.

2. Разработана модифицированная система управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом на базе тихоходного асинхронного двигателя безредукторной лифтовой лебедки, с изменяющейся структурой, отличающаяся наличием переключателя структуры управления и формирователя задания на потокосцепление.

3. Предложен способ адаптивного формирования потокосцепления тихоходного асинхронного двигателя в функции от текущего момента нагрузки, позволяющий за счет изменения жесткости механической характеристики повысить плавность перемещения кабины.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана компьютерная программа в среде MATLAB-Simulink для исследования процессов, происходящих в многомассовой механической системе безредукторной лифтовой лебедки.

2. Разработана модифицированная система управления асинхронным безредукторным электроприводом с переменной структурой, позволяющая осуществить необходимые режимы работы электропривода лифтовой лебедки.

3. Разработано программное обеспечение для специализированного преобразователя частоты, позволяющее реализовать микропроцессорное управление, на серийно-выпускаемом цифровом сигнальном микропроцессоре, асинхронным безредукторным электроприводом лифтового механизма.

4. Разработана экспериментальная лабораторная установка, позволяющая провести качественную и количественную оценку результатов теоретических исследований.

**Реализация результатов работы.** Диссертационная работы выполнена на кафедре Электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета и связана с реализацией государственного задания «Наука» на 2011-2012 годы. Результаты работы внедрены на предприятии ООО «Мехатроника-Софт»,

г. Томск при разработке программного обеспечения для микроконтроллерной системы управления преобразователем частоты серии USD, применяющегося для управления электроприводами лифтовых механизмов, а также в компании ООО «ИМПОРТ-ЛИФТ» при описании процедуры настройки регуляторов системы управления и порядка проведения пуско-наладочных работ при вводе в эксплуатацию преобразователей частоты. Результаты, полученные при выполнении работы, применяются в учебном процессе кафедры Электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке студентов по дисциплинам «Электропривод переменного тока», «Системы управления электроприводов», «Векторное управление в электроприводе переменного тока» и дипломном проектировании студентов. Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено актами о внедрении.

**На защиту выносятся:**

1. Математическое описание механической части частотно-регулируемого электропривода безредукторной лифтовой лебедки, в виде трехмассовой системы, учитывающее изменение моментов инерций и упругости тросов.

2. Способ управления электроприводом безредукторной лифтовой лебедки, с переключающейся структурой и следящим контуром положения.

3. Метод адаптивного формирования потокосцепления тихоходного асинхронного двигателя в функции от текущего момента нагрузки.

4. Результаты исследования системы управления безредукторным электроприводом лифтовой лебедки на имитационной модели и экспериментальной установке.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий:

– на IV конференции молодых ученых в рамках IX Международной конференции «Средства и системы автоматизации», г. Томск, 2007 г.

– на всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2007, НГТУ, г. Новосибирск, 2007 г.

– на серии региональной научно-практической студенческой конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ЭЭЭ, ТПУ, г. Томск, 2007-2008 г.

– на международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» ЭПЭ, ТПУ, г. Томск, 2007, 2009 г.

– на международной научно-практической Интернет-конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011», г. Одесса: Черноморье, 2011 г.

– на V международной научно-практической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии 2011», ЛГТУ, г. Липецк, 2011 г.

– на международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и экспериментальных исследований», г. Одесса, 2012.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 8 работах, в том числе в 2 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в 6 статьях и тезисах докладов.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из четырех глав и трех приложений. Общий объем работы составляет 129 страниц, включая 49 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 90 наименований и приложение из 15 страниц. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах» и «Имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

**В первой главе** проведён анализ основных требований, предъявляемых к подъемно-транспортным механизмам.

В первом разделе рассматриваются особенности конструкции и эксплуатации электроприводов лифтовых лебедок. Приводится классификация существующих типов электроприводов, основные особенности и отличия.

В настоящее время большинство электроприводов лифтовых лебедок представляют собой конструкцию, состоящую из многоскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, червячного редуктора и релейно-контакторной схемы управления. Вид редукторного электропривода лебедки представлен на рис. 1, а. Электропривод с редуктором обладает следующими недостатками технико-эксплуатационного характера: дополнительными затратами на покупку, установку и обслуживание редуктора; завышенной мощностью покупаемого и устанавливаемого двигателя из-за редуктора; быстрым изнашиванием тормозной системы.

Улучшение качественных характеристик лифтовых лебедок обеспечивается использованием современных регулируемых электроприводов. Развитие силовой и информационной электроники привело к созданию и последующему снижению стоимости преобразователей частоты (ПЧ), что позволяет лифтостроительным компаниям широко применять и внедрять регулируемые электроприводы переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель. В конце 90-х годов XX века в механизмах

подъема лифтов наметилась тенденция перехода к безредукторному электроприводу.

К преимуществам безредукторных электроприводов относятся: отсутствие редуктора, более высокая комфортабельность движения лифта, уменьшение уровня шума и вибраций. Безредукторные электроприводы активно развиваются как в России, так и за рубежом. На рис. 1, б, в соответственно представлены безредукторные электроприводы лифтовых лебедок производства финской компании KONE (KONE Inc.) и российской компании «РУСЭЛПРОМ».

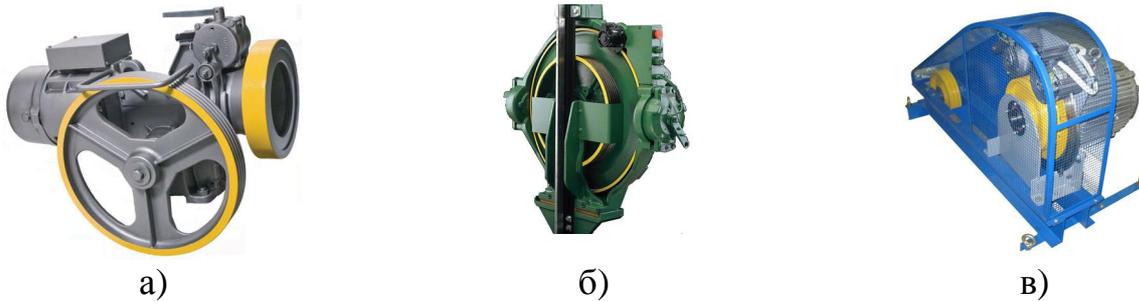


Рис. 1. Редукторные (а) и безредукторные (б), (в) электроприводы лифтовых лебедок

В конструкции зарубежных безредукторных лебедок в основном используются электроприводы на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. К сожалению, в России подобные технические решения из-за отсутствия производственной базы для их изготовления нашли ограниченное применение в лифтовых лебедках.

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время подавляющее большинство работ посвящено изучению и применению в электроприводах подъемных механизмов лифтовых лебедок стандартного асинхронного двигателя. Асинхронные двигатели широко используются в различных отраслях промышленности и общепромышленных грузоподъемных механизмах. В нашей стране имеется большой опыт разработки асинхронных двигателей различных типов и мощностей, поэтому создание и применение отечественного специализированного тихоходного двигателя для лифтовых лебедок, а, в дальнейшем, и электропривода на его базе, выглядит весьма перспективно.

При разработке системы управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки на базе тихоходного асинхронного двигателя необходимо рассмотреть ряд специфических вопросов, существенных для электропривода лифтовой лебедки и не получивших достаточного освещения в научно-технической литературе. А именно:

1. Влияние механической системы лифтовой лебедки с большими моментами кабины и противовеса на работоспособность и характеристики электропривода;

2. Согласованная работа электропривода и тормозной системы для обеспечения комфортности и безопасности перемещений и останова;

3. Плавное изменение момента и скорости асинхронного двигателя с целью демпфирования механических колебаний системы;

4. Учет особенностей тихоходного асинхронного двигателя и механической части системы, существенно влияющих на формирование переходных процессов при работе безредукторного электропривода лифтовой лебедки.

На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и поставлены задачи исследований.

**Во второй главе** рассматривается математическое описание электропривода безредукторной лифтовой лебедки.

Для описания процессов, происходящих в тихоходном асинхронном двигателе, составлена его имитационная модель в неподвижной системе координат, позволяющая исследовать различные режимы работы.

Структурная схема тихоходного асинхронного двигателя на рис. 2 с наибольшим приближением отражает процессы, происходящие в реальном тихоходном асинхронном двигателе.

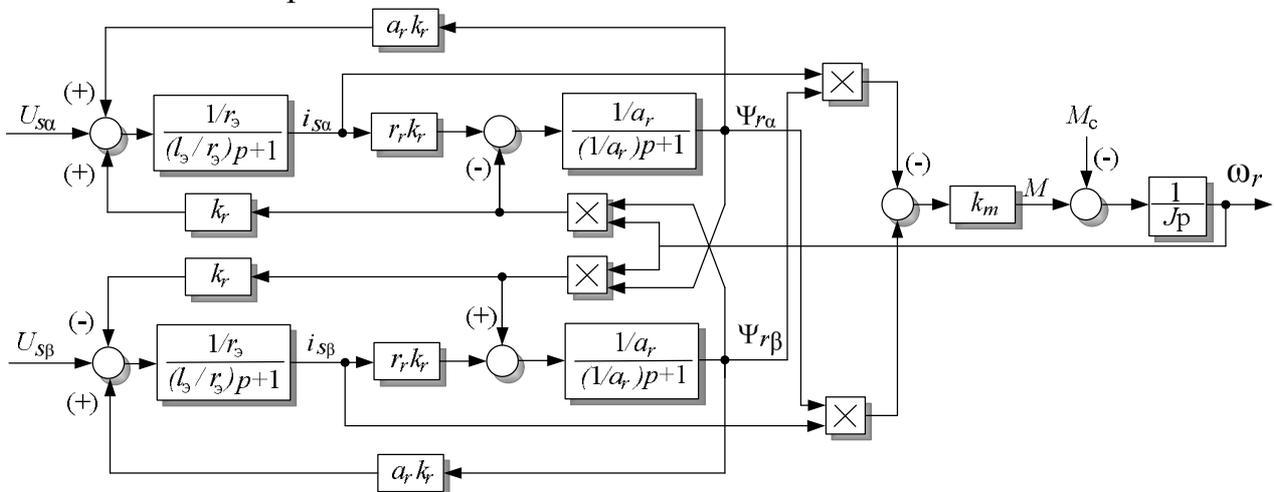


Рис. 2. Структурная схема тихоходного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

В структуре влияние насыщения магнитной цепи тихоходного асинхронного двигателя учтено перерасчетом коэффициентов  $l_s(i_m)$ ,  $r_s(i_m)$ ,  $k_r(i_m)$ ,  $a_r(i_m)$  на каждом шаге расчета модели.

Для математического описания механической части безредукторного лифтовой лебедки на базе тихоходного асинхронного двигателя применена трехмассовая расчетная схема, учитывающая изменение моментов инерций и упругостей тросов.

Для исследования характера протекания переходных процессов в трехмассовой механической системе (ТМС) принят ряд допущений, упрощающих построение математической модели:

1. Механическая часть ТМС представляет собой ряд абсолютно жестких масс, характеризующихся сосредоточенными моментами инерции.

2. Сосредоточенные массы механической части лифтовой лебедки соединены между собой упругими (податливыми) связями.

3. Деформации упругих связей нелинейны, но подчиняются закону Гука.

4. Демпфирование (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.

Система дифференциальных уравнений, описывающая трехмассовую механическую систему безредукторного электропривода лифтовой лебедки представлена ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{эп}} \frac{d\omega_{\text{эп}}}{dt} = M_{\text{эп}} - M_{12} + M_{23} - M_{\text{тр}} \\ J_{\text{к}} \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} = M_{12} - M_{\text{к}} \\ J_{\text{прот}} \frac{d\omega_{\text{прот}}}{dt} = M_{23} - M_{\text{прот}} \\ M_{12} = c_{j12} (j_{\text{эп}} - j_{\text{к}}) + b_{12} (\omega_{\text{эп}} - \omega_{\text{к}}) \\ M_{23} = c_{j23} (j_{\text{эп}} - j_{\text{прот}}) + b_{23} (\omega_{\text{эп}} - \omega_{\text{прот}}) \\ M_{\text{тр}} = M \cdot \text{sign}(\omega_{\text{эп}}) \end{array} \right. , \quad (2)$$

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;

$c_{j12}$ ,  $c_{j23}$  – 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  $(\omega_{\text{эп}} \leq 0)$ .

Учет изменения длины тросов во время работы лифтовой лебедки, а, следовательно, и их массы, осуществляется по выражениям (3) и (4):

Масса тросов со стороны кабины:

$$m_{\text{трк}} = 0.349 \cdot N_{\text{тр}} \cdot L_{\text{трк}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{тр}}$  – количество тросов,  $L_{\text{трк}}$  – длины тросов со стороны кабины.

Масса тросов со стороны противовеса

$$m_{\text{трпрот}} = 0.349 \cdot N_{\text{тр}} \cdot L_{\text{трпрот}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{тр}}$  – количество тросов,  $L_{\text{трпрот}}$  – длина тросов со стороны противовеса.

Согласно системе уравнений (2) составлена структурная схема исследуемой трехмассовой механической системы механической части безредукторного электропривода лифтовой лебедки, представленная на рис. 3.

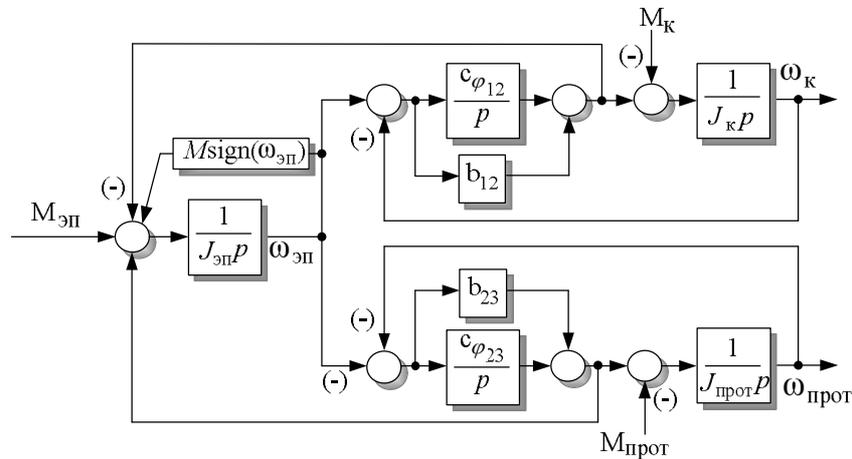


Рис. 3. Структурная схема трехмассовой механической системы безредукторной лифтовой лебедки

Следует отметить, что исследованиями механической части безредукторной лифтовой лебедки методом математического моделирования с помощью трехмассовой механической системы было установлено, что в отличие от двухмассовой механической системы, данные исследования позволяют получить уточненные значения частот собственных колебаний всей механической системы лифтовой лебедки, позволяющие скорректировать частоты собственных колебаний кабины и противовеса для исключения резонансных явлений.

На рис. 4 приведены логарифмические амплитудно-частотные характеристики безредукторной лифтовой лебедки в зависимости от длины троса и загрузки кабины.

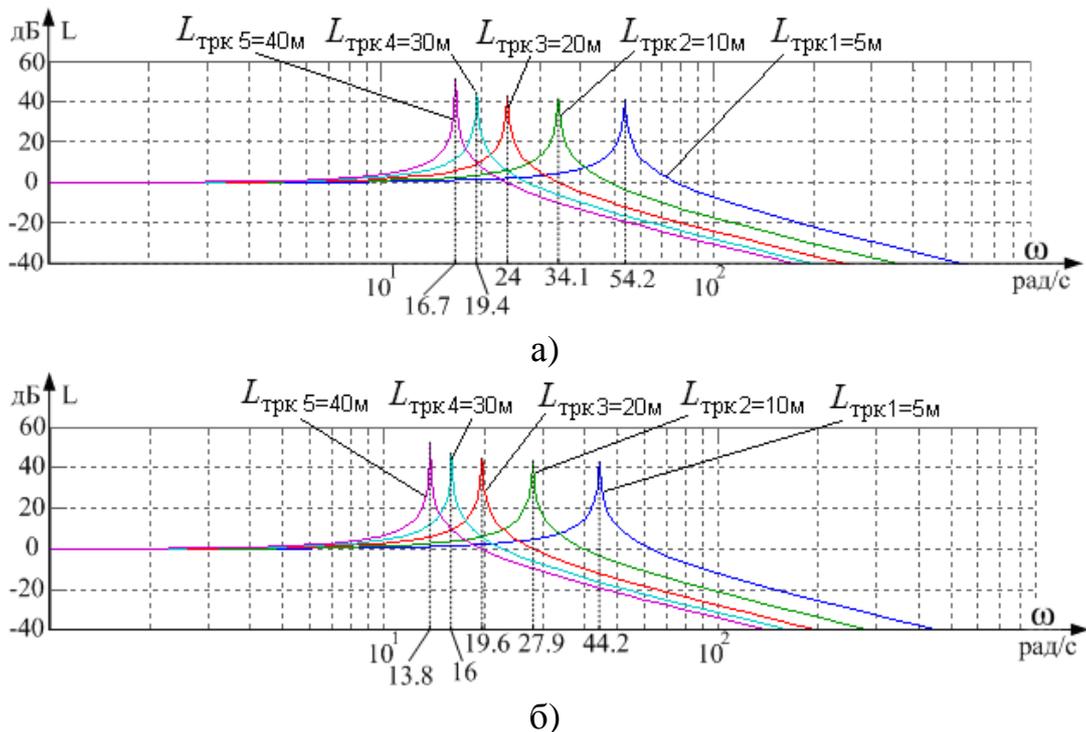


Рис. 4. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики для различной загрузки кабины и длины троса.

а) – кабина лифта пустая, б) – кабина лифта полностью загружена



потокосцепления на номинальном уровне способствует формированию жесткой характеристики момента, которая приводит к рывку момента на валу двигателя и, как следствие, к колебаниям кабины и противовеса, что уменьшает комфортность передвижения в кабине и отрицательно влияет на ресурс механического оборудования. Для исключения колебательного эффекта предложен способ адаптивного формирования потокосцепления тихоходного асинхронного двигателя в функции от текущего момента нагрузки, позволяющий формировать мягкие характеристики по моменту, исключая рывки момента и колебания кабины и противовеса.

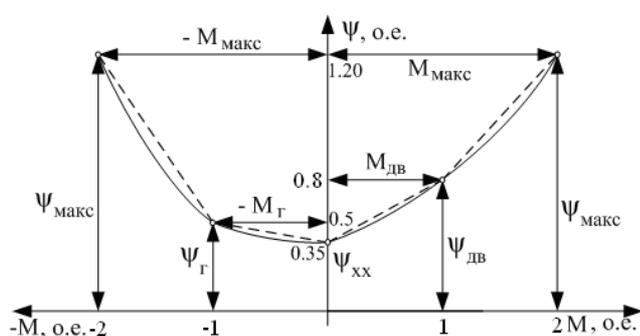


Рис. 6. Кривая формирования потокосцепления в функции от текущего момента нагрузки

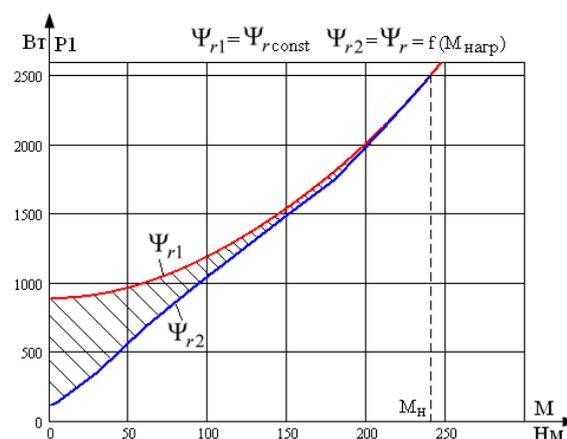


Рис. 7. Характеристики активной мощности при различных способах формирования потокосцепления ротора

Кроме того, при формировании постоянного по величине потокосцепления ротора на номинальном уровне, отношение активной мощности к моменту двигателя  $P_1/M (\Psi_r = const)$  представляется нелинейной кривой, а отношение вышеуказанных величин при адаптивном формировании потокосцепления  $P_1/M (\Psi_r (M_{нагр}))$  имеет линейный характер (рис. 7). Заштрихованная область (рис. 7), представляет потери энергии, которые можно исключить, используя способ адаптивного формирования потокосцепления в функции от момента нагрузки и повысить КПД лифтовой установки.

На рис. 8 показаны кривые переходных процессов асинхронного безредукторного электропривода лифтовой лебедки в режиме переменной структуры.

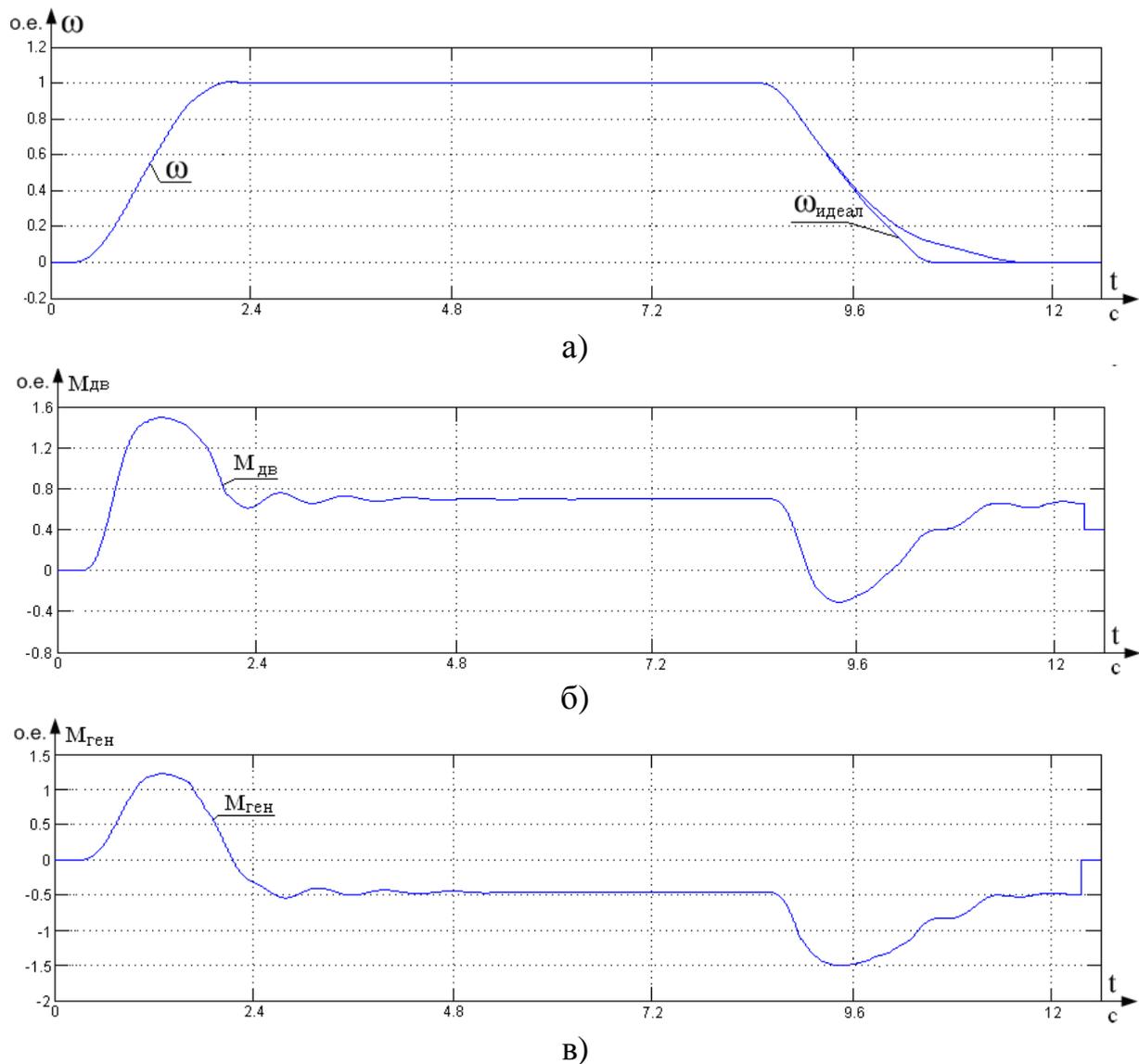


Рис. 8. Кривые переходных процессов асинхронного безредукторного электропривода лифтовой лебедки в режиме переменной структуры а) – скорость кабины лифтовой лебедки, б) – момент на валу двигателя в двигательном режиме, в) – момент на валу двигателя в генераторном режиме

Анализ кривой переходного процесса безредукторного электропривода по скорости показывает его хорошее совпадение с идеальной кривой скорости лифтовой лебедки.

**В четвёртой главе** описываются особенности практической реализации разработанной модифицированной системы управления, излагаются результаты экспериментальных исследований работы асинхронного безредукторного электропривода лифтовой лебедки на базе тихоходного асинхронного двигателя с модифицированной системой управления. Оценка работоспособности модифицированной системы управления и показателей качества безредукторного электропривода лифтовой лебедки производилась на лабораторной установке, а затем на действующей лифтовой лебедке.

Общий вид лабораторной установки и действующей лифтовой лебедки представлены на рис. 9 и рис. 10, а на рис. 11 представлена функциональная схема лифтовой лебедки.



Рис. 9. Общий вид лабораторной установки



Рис. 10. Общий вид безредукторного электропривода действующей лифтовой лебедки

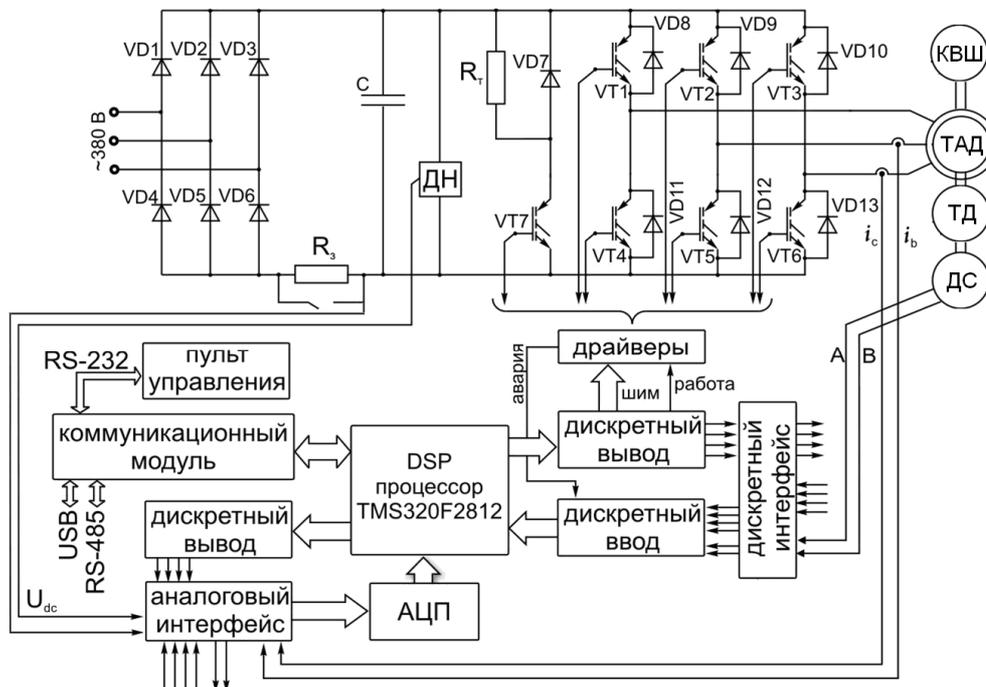


Рис. 11. Функциональная схема безредукторного электропривода лифтовой лебедки

Электромеханическая часть лабораторной установки (рис. 9) состоит из нагрузочного асинхронного двигателя с фазным ротором и испытуемого тихоходного асинхронного двигателя, связанных между собой редуктором. В качестве управляющего устройства, на котором реализована система управления, выбран цифровой сигнальный микропроцессор TMS320F2812. Программирование микроконтроллера осуществлялось на языке C++ в среде Code Composer Studio.

На рис. 12 представлены экспериментальные кривые переходных процессов асинхронного безредукторного электропривода.

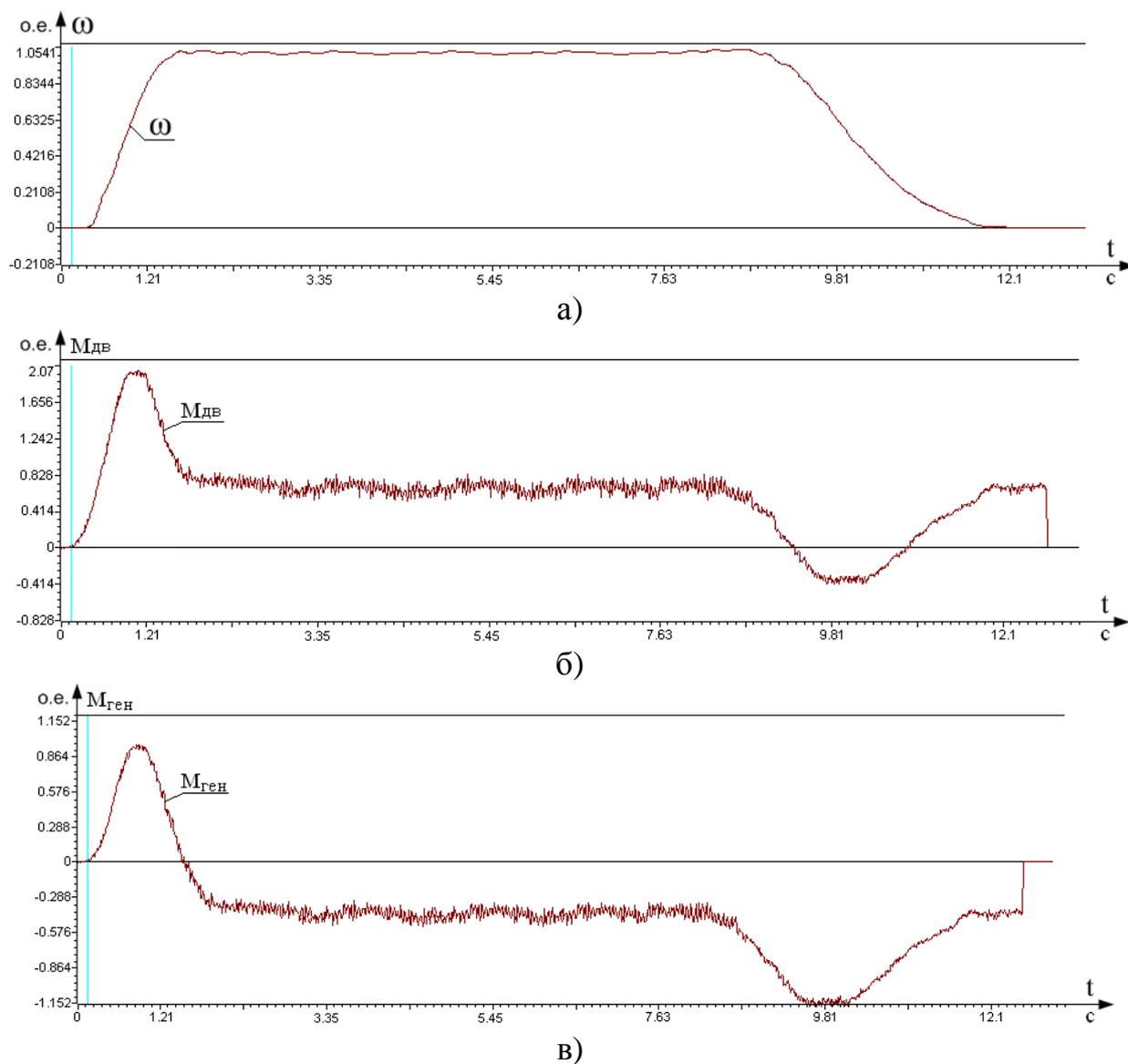


Рис. 12. Кривые переходных процессов асинхронного безредукторного электропривода лифтовой лебедки в режиме переменной структуры, полученные на действующем лифте

а) – скорость кабины лифтовой лебедки, б) – момент на валу двигателя в двигательном режиме, в) – момент на валу двигателя в генераторном режиме

Сравнение вышеприведенных экспериментальных кривых переходных процессов с характеристиками, представленными на рис. 8 полученными с помощью имитационной модели, показывает их хорошую качественную и количественную сходимость, что доказывает правильность теоретических положений, предложенных в диссертации. Совпадение результатов составляет 7%.

**В приложении** приведены имитационные модели, реализованные в программном пакете Matlab и акты внедрения результатов выполненной работы на производстве и в учебный процесс.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации изложены теоретические и практические результаты работы, имеющие народно-хозяйственное значение – развитие теории и практическая реализация модифицированной системы управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки с микропроцессорным управлением, обеспечивающая улучшение качественных показателей электроприводов лифтовых лебедок.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что асинхронный безредукторный электропривод лифтовой лебедки по системе преобразователь частоты – тихоходный асинхронный двигатель является нестандартным и перспективным для применения в отечественном лифтовом парке.

2. Предложено математическое описание механической части безредукторной лебедки, в виде трехмассовой системы, учитывающей изменение моментов инерций и упругостей тросов. Особенность математического описания подтверждена результатами имитационного моделирования и экспериментальными исследованиями на действующих лифтовых установках.

3. Создана математическая модель многомассовой механической системы асинхронного безредукторного электропривода, позволяющая провести анализ и выполнить формирование требований к системе управления преобразователем частоты для электроприводов безредукторных лифтовых лебедок.

4. Разработана модифицированная система управления асинхронным безредукторным электроприводом с переменной структурой, позволяющая увеличить точность и плавность останова кабины на этажной площадке (с  $\pm 7$  до  $\pm 2$  мм).

5. Предложен способ адаптивного формирования потокосцепления тихоходного асинхронного двигателя лифтовой лебедки в функции от текущего момента нагрузки, позволяющий изменять жесткость его механических характеристик и обеспечить плавность перемещения кабины. Установлено, что диапазон изменения жесткости составляет от 14 до 43.

6. Проведен синтез структуры и параметров настройки регуляторов системы векторного управления асинхронным безредукторным электроприводом. Установлено, что показатели качества каждого контура регулирования соответствуют ожидаемым значениям.

7. Разработано универсальное программное обеспечение для микроконтроллерной системы управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки, позволяющее применить его для управления электроприводами общепромышленных подъемных механизмов.

8. Проведенные экспериментальные исследования системы управления безредукторным электроприводом лифтовой лебедки на лабораторном стенде показали ее работоспособность, эффективность и хорошую сходимость

результатов экспериментов с имитационным моделированием. Сходимость результатов составляет (7%).

**Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:**

1. Тургенев Д.В. Анализ трехмассовой механической системы для безредукторного привода лифтовой лебедки / Д.В. Тургенев // **Электротехнические комплексы и системы управления : журнал.** – 2012. – № 1 (25) – С. 59 – 63.

2. Тургенев Д.В. Модифицированная система управления асинхронным безредукторным электроприводом лифтовой лебедки [Электронный ресурс] / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // **Современные проблемы науки и образования : электронный научный журнал.** – 2012. – № 2. – Электрон. дан. – URL: [www.science-education.ru/102-6052](http://www.science-education.ru/102-6052).

3. Тургенев Д.В. Особенности механики лифтов с безредукторным приводом лебедки / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // **Электромеханические преобразователи энергии 2009 : сборник трудов международной научно-технической конференции.** – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2009. – С. 236 – 240.

4. Тургенев Д.В. Организация микропроцессорного управления асинхронным электроприводом / Д.В. Тургенев // **Электротехника, электромеханика и электротехнологии 2008 : сборник трудов региональной научно-практической студенческой конференции.** – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2008. – С. 111 – 115.

5. Тургенев Д.В. Микропроцессорная реализация системы управления асинхронным двигателем / Д.В. Тургенев // **Электротехника, электромеханика и электротехнологии 2007 : сборник трудов региональной научно-практической студенческой конференции.** – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2007. – С. 194 – 198.

6. Тургенев Д.В. Особенности процессов в силовом канале частотно-регулируемого электропривода безредукторной лифтовой лебедки / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // **Энергетика и энергоэффективные технологии : сборник докладов V международной научно-практической заочной конференции.** – Липецк : Изд-во Липецк. гос. технич. ун-т, 2012. – С. 100 – 103.

7. Тургенев Д.В. Современное состояние приводов лифтов / Д.В. Тургенев, Ю.Н. Дементьев, С.В. Ланграф // **Сборник научных трудов SWorld : материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011».** – Одесса : Черноморье, 2011. – Вып. 4, т. 9. – 411-0414. – С. 40 – 43.

8. Тургенев Д.В. Моделирование и исследование асинхронного безредукторного электропривода лифта с комбинированным управлением // Сборник научных трудов SWorld : материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012». – Одесса : Черноморье, 2012. – Вып. 1, т. 8. – 112-402. – С. 31 – 35.

#### **Личный вклад автора**

Автором единолично написано четыре работы [1], [3-4], [8]. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: анализ режимов работы лифтов [3] (80%), исследование особенностей процессов и проведение экспериментов [6] (50%), анализ конструкций электроприводов лифтов [7] (80%), разработка модифицированной системы управления [2] (70%).

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту кафедры электропривода и электрооборудования Ланграфу Сергею Владимирову за практические советы в работе над диссертацией.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета за помощь и моральную поддержку.