

На правах рукописи



Авдошин Вадим Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С  
РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В  
МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ  
МЕХАНИЗМАХ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Степанов Владимир Михайлович**

**Официальные оппоненты:** **Мещеряков Виктор Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет»,  
заведующий кафедрой «Электропривод»

**Борисов Павел Андреевич,**  
кандидата технических наук,  
ООО «ПОПГН «Интеграл», г. Тула  
инженер-проектировщик по  
электроснабжению

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2017г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.12 на базе федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд.9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте <http://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан «26» октября 2017г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Хмелев  
Роман Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В условиях тенденции роста тарифов на электрическую энергию, рекуперация электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах приобретает важное значение в развитии электротехнических систем и является одним из перспективных направлений повышения эффективности их функционирования, что позволяет как дополнительно генерировать электрическую энергию, так и ее использовать для собственных нужд.

Режимам работы электродвигателей, работающих в генераторном режиме в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах посвящены работы В.И. Ключева, В.К. Калинина, А.Н. Анисова, Г.И. Криштафовича, В.Я.Пахомова, А.Ю. Портного, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, Г.П. Кузнецова, Л.А. Баранова, И.С. Мелешина, Л.М. Чинь, Г.Г. Рябцева, И.А. Ермакова, Н.А. Рубичева.

В работах Степанова В.М. и Котеленко С.В. показано, что в научных трудах выше перечисленных авторов электротехнические системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов включают число электродвигателей более трех и их конструктивные схемы имеют зависимое и независимое исполнение в зависимости от применяемой технологии их использования. При зависимых электромеханических системах многодвигательных подъемно-транспортных механизмов при рекуперации электрической энергии требуется синхронизация работы электродвигателей. Для каждой независимой электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов применяется своя система рекуперации электрической энергии. Поэтому создание универсального электротехнического устройства накопления электрической энергии с последующим его резервированием повышает эффективность функционирования электромеханических систем многодвигательных подъемно-транспортных механизмов и формирование в них рекуперации электрической энергии до 30%. Дополнительно вырабатываемая электрическая энергия передается либо в электрическую сеть, либо используется для собственных нужд, учитывая, как одновременную работу электродвигателей в генераторном режиме, так и попеременную их работу в зависимости от технологии использования многодвигательных подъемно-транспортных механизмов. Наиболее актуальным является применение электромеханических систем подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, перед которыми стоит важная задача, учитывающая взаимное влияние точности системы торможения и скорости движения объекта исследования, что позволяет повысить эффективность точности позиционирования, надёжность электромеханических систем подъемно-транспортных механизмов, и

позволяет снизить потребляемую электродвигателями электроэнергию и повысить коэффициент их полезного действия. Кроме того, динамические нагрузки на исполнительных органах электромеханических систем многодвигательных подъемно-транспортных механизмов за счет функциональных связей с валом электродвигателей приводят к снижению качества и увеличению потерь электрической энергии, а также ухудшению надежности их работы.

Функциональные связи тормозных систем со скоростными системами многодвигательных подъемно-транспортных механизмов показывают, что их электромеханические системы должны функционировать в следящем режиме, что позволяет повысить точность позиционирования, надежность и эффективность электромеханических систем.

Использование реактивно-вентильного электродвигателя в следящих электромеханических системах многодвигательных подъемно-транспортных механизмов упрощает их структуру и конструкцию за счет безредукторного исполнения, кроме того, простота конструкции реактивно-вентильного электродвигателя обеспечивает технологичность и низкую стоимость их изготовления.

В совокупности перечисленное, снижает энергоемкость как процесса изготовления, так и функционирование многодвигательных подъемно-транспортных электромеханических систем с реактивно-вентильными электродвигателями, работающих в генераторном режиме.

Стоит отметить, что возможно и упрощение конструкции реактивно-вентильного электродвигателя, работающего в генераторном режиме и состоящего из безобмоточного ротора, статора, имеющего полюса с обмотками. За счет дополнительного размещения на полюсах статора обмоток контроля, расположенных с определенным шагом, обеспечивающие определение положение ротора, вследствие изменения магнитного поля. Это позволит упростить конструкцию и уменьшить стоимость реактивно-вентильного электродвигателя путем отказа от использования датчика положения ротора.

**Цель работы** – повышение эффективности функционирования электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, резервированием электрической энергии универсальными устройствами ее накопления и дозированным питанием, путем обоснования их структуры и параметров, комплексно учитывающих электромагнитные и электромеханические процессы, и, функциональные связи тормозных устройств и систем движения, обеспечивающих требуемый уровень надежности, позиционирования и потребления электрической энергии.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Анализ конструктивных схем и режимов работы электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, расчетов их параметров, надежности работы и условий эксплуатации.

2. Разработка математической модели электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями при различных режимах работы с резервированием электрической энергии, в комплексе учитывающей характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

3. Исследование математической модели электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями для обоснования их рациональных параметров и структуры.

4. Определение закономерностей формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов в электротехнической системе рекуперации электрической энергии и управляющих воздействий в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, работающих в генераторном режиме.

5. Определение рациональных параметров, требуемых уровней надежности и позиционирования в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

6. Определение структуры и топологии управления режимами работы в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

7. Численные и экспериментальные исследования режимов работы при применении технических решений по системе рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

**Идея работы.** Достижение требуемого уровня функционирования электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, путем обоснования их рациональных параметров и структуры, в комплексе учитывающей характеристики электромеханических и электромагнитных процессов и функциональных связей тормозных систем.

**Объектом исследования** является электротехническая система рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

**Предметом исследования** являются переходные электромеханические и электромагнитные процессы, протекающие в электротехнической системе рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

**Методы исследования**, используемые в работе, основаны на совокупности теории электрических цепей, методов математического моделирования, методов расчета параметров переходных процессов, теории автоматического управления, теории надежности технических систем, теории подобия, имитационного проведения вычислительных экспериментов и экспериментальных исследований с использованием современных компьютерных средств.

**Автор защищает:**

1. Математическую модель электротехнической системы рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, в комплексе учитывающей характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

2. Закономерности формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов в электротехнической системе рекуперации электрической энергии с универсальным устройством накопления электрической энергии и дозированным питанием в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

3. Условия реализуемости математической модели электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

4. Рациональные режимные и конструктивные параметры электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, учитывающих в структуре полюсов статора обмотки контроля, расположенные с определенным шагом для бездатчикового определения положения ротора.

**Научная новизна** заключается в определении рациональных структуры и параметров электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных

подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, закономерностей формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов, функциональных связей, в процессе торможения и скоростной работы, а так же управляющих воздействий для управления их режимами работы.

Она представлена следующими результатами:

- установлены закономерности формирования управляющих воздействий для управления режимами работы в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями;

- получены зависимости для определения рациональных структуры и параметров электротехнических систем рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, учитывающие в комплексе закономерности формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов, функциональных связей, в процессе торможения и скоростной работы, а так же управляющих воздействий для управления их режимами работы.;

- разработана методика расчета рациональных параметров и параметрического ряда электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы** обеспечены обоснованными допущениями, адекватностью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождения между которыми не превышают 14%, что допустимо в инженерных расчетах.

**Практическое значение.** Разработана методика определения рациональных структуры и параметров электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, в комплексе учитывающих характеристики электромеханических и электромагнитных процессов торможения и скоростной работы, возникающих в обмотках контроля полюсов статора, расположенных с определенным шагом для бездатчикового определения положения ротора.

**Реализация результатов работы.** Основные научно-практические результаты диссертационной работы переданы для использования АО «Газпром газораспределение Тула». Результаты работы использованы в учебных курсах «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Переходные процессы в электроприводах», «Электромеханика»,

«Электрический привод», «Средства коммутации электрической энергии» на кафедре «Электроэнергетика» Тульского государственного университета.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных молодежных научно-технических конференциях.

ТулГУ (г. Тула, 2012 - 2015 гг.) и VII, X магистерская научно-практических конференциях ТулГУ, VII региональная молодежная научно-практическая конференция ТулГУ «Молодежные инновации», Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2012» в рамках X Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность - 2012» в рамках I Международного электроэнергетического форума «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (г. Москва, 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2013» в рамках XI Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2013 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение - 2014» в рамках XII Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке», VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012» (г. Иваново, 2012 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы изложены в 5 статьях, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 97 наименования, содержит 34 рисунка и 3 таблицы. Общий объем - 118 страниц.

**Личный вклад автора.** Разработаны топология и математическая модель электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, и, установлены зависимости для определения закономерностей формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов, их рациональных параметров и структуры управления режимами работы. Проведены численные и экспериментальные исследования, подтвердившие работоспособность системы и правильность теоретических исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая

значимость работы.

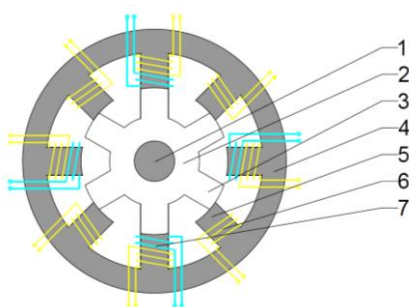
**В первой главе** проведен анализ научно-практической литературы, конструктивных схем, условий их эксплуатации, методов моделирования, систем рекуперации электрической энергии, многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, тормозных устройств и реактивно-вентильного электродвигателя.

Обобщенная схема должна учитывать особенности реактивно-вентильного электродвигателя и системы накопления электрической энергии, которые должны быть функционально связаны, с учетом параметров реактивно-вентильного электродвигателя, работающего как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Применение в системе электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмов более трех двигателей возможно путем введения универсальных устройств накопления электрической энергии с учетом их резервирования и применяемых как в электромеханических системах с независимым исполнением так в электромеханических системах с зависимым исполнением.

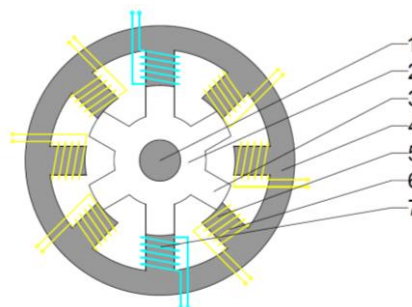
Необходимо разработать математическую модель электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с резервированием универсальных устройств накопления электрической энергии и дозированным питанием, а так же определить закономерности формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов в электротехнической системе рекуперации электрической энергии и управляющих воздействий для управления режимами работы универсальных электротехнических устройств накопления электрической энергии и дозированного питания в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах.

Конструкция реактивно-вентильного электродвигателя при работе в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с возможностью управления электродвигателями для резервирования электрической энергии и дозированного питания, должна учитывать упрощение ее функциональной схемы за счет возможности бездатчикового определения положения ротора в реактивно-вентильном электродвигателе.

**Во второй главе** поставленная задача по разработке новых технических решений по повышению эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильными электродвигателями в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах, достигается за счет предложенного конструктивного исполнения реактивно-вентильного электродвигателя, представленная на рис. 1,2.



*Рис. 1 - общий вид реактивно-вентильного двигателя с совмещенными обмотками.*



*Рис. 2 - общий вид реактивно-вентильного двигателя с разделенными обмотками.*

На рис. 1 (с совмещенными обмотками) и рис. 2 (с разделенными обмотками) изображен общий вид реактивно-вентильного двигателя. На валу 1 размещен безобмоточный ротор 2 с полюсами 3, так же имеется статор 4 с полюсами 5, поочередно охваченными фазными обмотками 6 и обмотками контроля 7, расположенными с определенным шагом. Функциональная схема реактивно-вентильного двигателя представлена на рис. 3.

Одним из методов бездатчикового определения положения ротора является использование для формирования измерительных МДС при помощи фазных обмоток, что и для формирования силовых токов, отвечающих за формирование электромагнитного момента. Однако при работе реактивно-вентильного двигателя в режиме генератора, определение необходимой точности положения ротора возможно только с дополнительно намотанными обмотками контроля. Для определения положения ротора необходимо в полюсах, имеющих разные магнитные проводимости, магнитной системы реактивно-вентильного двигателя сформировать измерительные МДС, связанные между собой квадратурными соотношениями, частотой порядка 10 кГц. Так как магнитная проводимость под полюсами реактивно-вентильного двигателя различна и зависит от углового положения ротора, то связанные между собой квадратурно магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе реактивно-вентильного двигателя с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора реактивно-вентильного двигателя.

Разработанная система управления реактивно-вентильными электродвигателями в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с системой рекуперации электрической энергии, определяется в зависимости от режима работы двигателя. Общая блок-схема устройства управления представлена на рис. 4

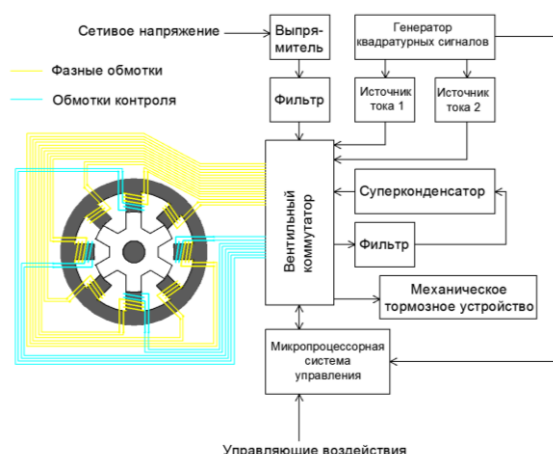


Рис. 3 – Функциональная схема реактивно-вентильного двигателя

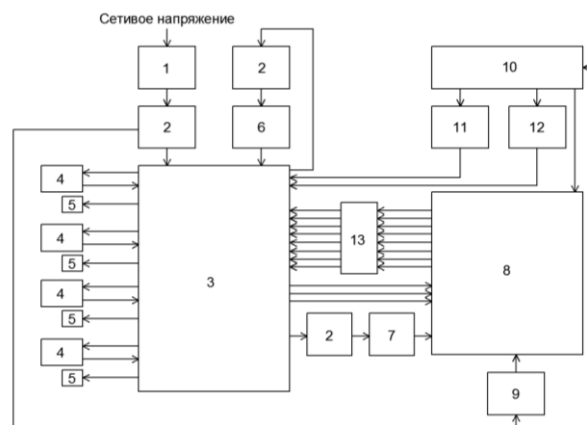


Рис. 4 – Принципиальная блок-схема устройства управления

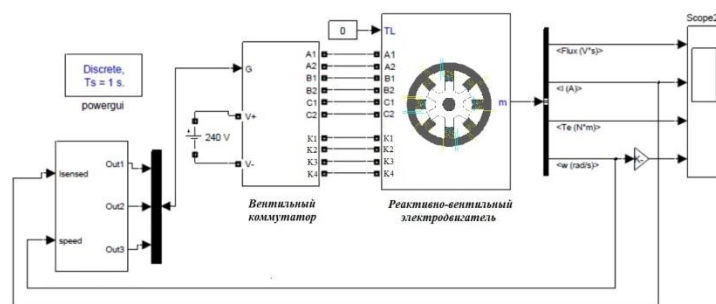
Определены рациональные параметры многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями по критерию надёжности и рассчитан требуемый уровень (Таблица 1).

Таблица 1  
Уровень показателей надёжности электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями

| $q_{нм}$  | $P_{нм}$   | $\lambda_{нм}, 1/ч$ | $t_{нм}, ч$ | $T_{онм}, ч$ | $t_{онм}, ч$ |
|-----------|------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|
| 0,0069    | 0,9941     | 0,0029              | 15,9        | 569,1        | 1,45         |
| $K_{гнм}$ | $k_{тинм}$ | $k_n$               | $K_n$       | $k_m$        | $k_0$        |
| 0.9981    | 0,9529     | 1,28-1,8            | 1,57-1,91   | 0,9973       | 0,751        |

Разработаны новые технические решения системы рекуперации электрической энергии в многодвигательном подъемно-транспортном механизме с реактивно-вентильными электродвигателями. Установлены зависимости для расчета уровня показателей надёжности и определены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, для реализации математической модели. На основе установленных зависимостей определены показатели надёжности.

В третьей главе проведено моделирование переходных процессов в электромеханических системах рекуперации с реактивно-вентильными электродвигателями в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. Общая схема имитационной модели трехфазной реактивно-вентильного электродвигателя с вентильным коммутатором показана на рис. 5.



*Рис. 5 Общая схема реактивно-вентильного электродвигателя, с обмотками контроля*

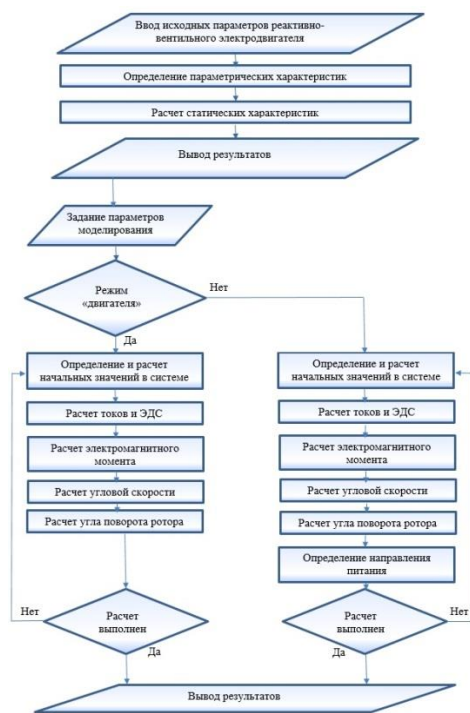
В соответствии с алгоритмом (рис. 6) при моделировании выполнен расчет параметров реактивно-вентильного электродвигателя, заданы параметры моделирования, на первом этапе определены режимы работы и проведено определение и расчет напряжения питания и токов фаз с помощью зависимости индуктивности и ЭДС в обмотках. При моделировании могут изменяться и внешние параметры реактивно-вентильного электродвигателя: внешний момент на валу, напряжение питания и др. На втором этапе определены электромагнитный момент, угловая скорость, угол поворота ротора. Первый и второй этапы повторяется многократно до достижения определенного условия, которое задается временным интервалом.

На заключительном этапе результаты расчета выводятся в виде осциллограмм переменных характеристик реактивно-вентильного электродвигателя и динамических параметров. Реализация обобщенной математической модели реактивно-вентильного электродвигателя выполняется в математическом пакете Matlab – Simulink. Имитационная модель в Simulink обладают удобством работы при достаточной точности и быстродействии.

Разработанная математическая модель позволяет проводить расчет статических и динамических характеристик реактивно-вентильного электродвигателя. Такое построение математической модели позволяет встраивать ее в программы, для последующей оптимизации системы по отдельным параметрам.

Исследование разработанной математической модели проводилось на ЭВМ с помощью пакета программ, разработанных для сложных дифференциальных уравнений.

С помощью пакета программ Matlab – Simulink было проведено исследование разработанной математической модели.

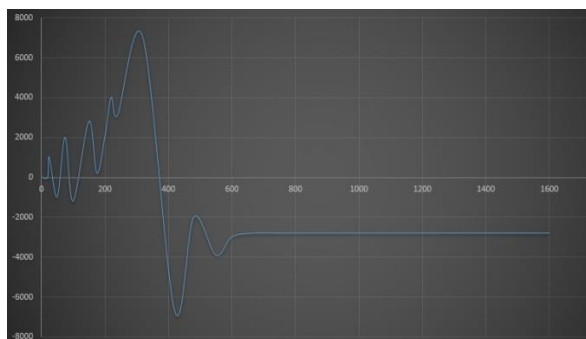


*Рис.6 Алгоритм математической модели реактивно-вентильного электродвигателя*

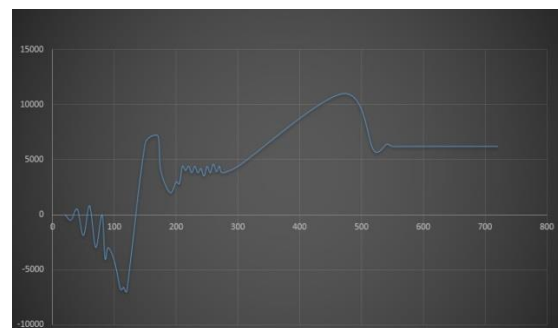
Результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя показаны на рис. 7,8.

Исследование математической модели показало, что использование реактивно-вентильного двигателя в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах повышает эффективность 10-15% в сравнении с использованием асинхронных двигателей в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах.

Определен параметрический ряд и проведено исследования устойчивости системы рекуперации. Для определения параметрического ряда (таблица 2) оборудования систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями используем формулу с обобщенным показателем энергетической эффективности электропривода.



*Рис. 7. Потребление мощности двигателя, работающего в генераторном режиме*



*Рис. 8. Вырабатываемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме*

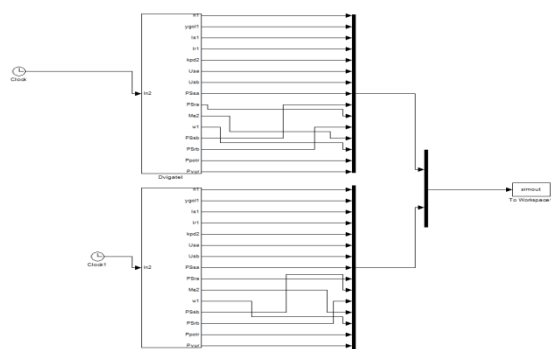
Таблица 2

| $P_{\text{ген}}, \text{кВт}$ | $N_{\text{ген}}$ | $\chi$ | $I_{\text{ТП}}, \text{А}$ | $N_{\text{ген}}$ | $\chi$ | $I_{\text{ТП}}, \text{А}$ |
|------------------------------|------------------|--------|---------------------------|------------------|--------|---------------------------|
| 315                          | 3                | 0,997  | 3,38                      | 4                | 0,998  | 4,5                       |
| 250                          | 3                | 0,996  | 2,68                      | 4                | 0,997  | 3,57                      |
| 160                          | 3                | 0,991  | 1,7                       | 4                | 0,993  | 2,29                      |
| 90                           | 3                | 0,989  | 0,96                      | 4                | 0,991  | 1,29                      |
| 45                           | 3                | 0,985  | 0,43                      | 4                | 0,988  | 0,64                      |
| 30                           | 3                | 0,984  | 0,32                      | 4                | 0,985  | 0,43                      |
| 15                           | 3                | 0,981  | 0,16                      | 4                | 0,982  | 0,21                      |
| 3                            | 3                | 0,975  | 0,032                     | 4                | 0,98   | 0,043                     |

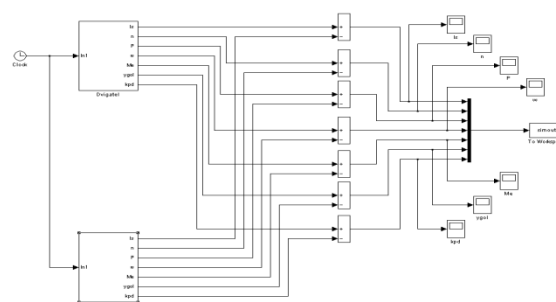
На основе структурных схем, разработана имитационная модель (рис. 9,10), которая является формой динамической математической модели систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов и позволяет анализировать переходные процессы, протекающие в системе и определять ее рациональные параметры.

В результате исследования получены результаты моделирования в программе Matlab в пакете Simulink на рис. 11.

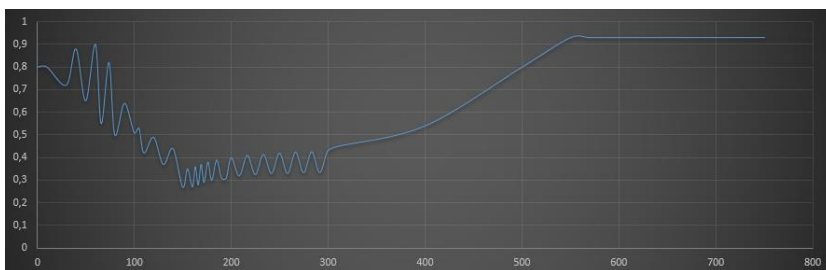
Из результатов установлено, что эффективность, достигнутая за счет рациональных, конструктивных и режимных параметров новых технических решений составила 20-25%.



*Рис.9 Имитационная модель для зависимой электромеханической систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов*



*Рис.10 Имитационная модель для независимой электромеханической систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов*



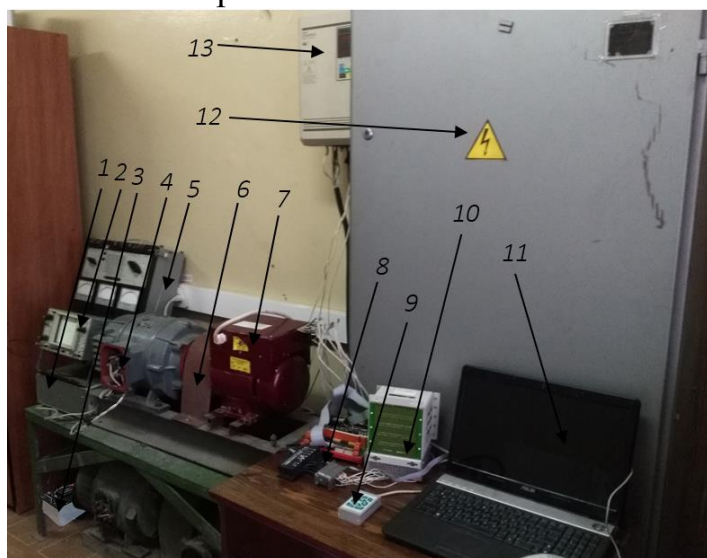
*Рис.11 Работа  
системы  
рекуперации  
электрической  
энергии  
многодвигательных  
подъемно-  
транспортных  
механизмов*

Разработана математическая модель многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, учитывающая функциональные связи тормозного устройства и режима генерации электрической энергии. Установлены зависимости для расчёта характеристик реактивно-вентильных электродвигателей подъемно-транспортных механизмов на основе которых разработана методика их выбора. В результате моделирования переходных процессов электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, установлены закономерности формирования в них управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый уровень позиционирования в процессе торможения обеспечивающее эффективное функционирование системы рекуперации. Определены параметрический ряд, и, рациональные режимные и конструктивные параметры. Разработана математическая модель системы рекуперации электрической энергии для электромеханических систем с независимым исполнением кинематики многодвигательных подъемно-транспортных механизмов. Установлены закономерности формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов в системе рекуперации электрической энергии и управляющих воздействий для управления режимами работы многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями. Установлены зависимости на основе исследования математической модели для расчета рациональных конструктивных и режимных параметров системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, учитывающие характеристики электромеханических и электромагнитных процессов, и, требуемый уровень надежности их работы.

**В четвертой главе** проведены экспериментальные исследования применения разработанной структуры системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильными электродвигателями в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. Проводимые работы и испытания

основаны на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путём исследования функциональной избыточности. В качестве показателя функциональной избыточности в параметрической модели системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, принят коэффициент запаса (надёжности). Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в лабораторных условиях. Разработанный стенд с аппаратурой экспериментальных исследований для электромеханической системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильным электродвигателем представлены на рис. 12.

Методика экспериментальных исследований системы рекуперации электрической энергии основана на принципе работы системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями с учетом новых технических решений.



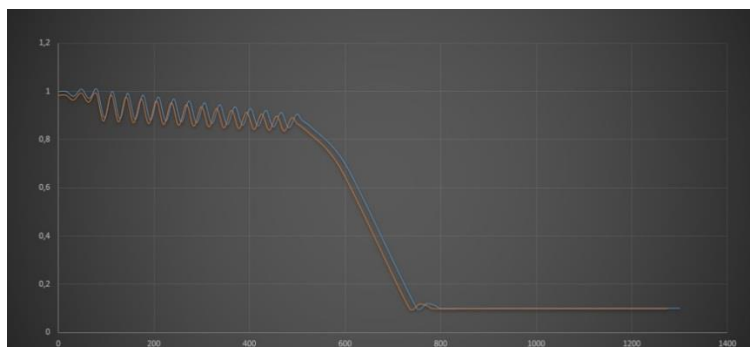
*Рис. 12 Стенд и аппаратура экспериментальных исследований для электромеханической системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильным электродвигателем*

Где:

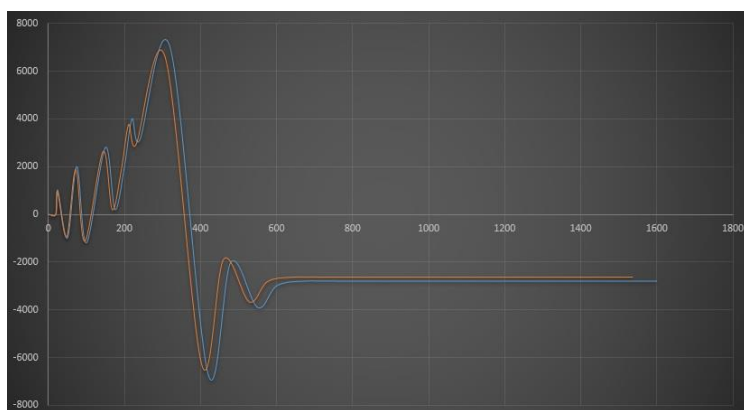
1- источник квадратурных токов для формирования измерительной ЭДС, состоящий из двух линейных источников тока, выполненных на транзисторах и операционном усилителе, и генератора квадратурных сигналов; 2-осциллограф; 3-суперконденсатор системы рекуперации электрической энергии; 4-генератор, для моделирования генераторного режима реактивно-вентильного электродвигателя; 5-датчики тока и напряжения; 6-муфта с механическим тормозным устройством; 7-реактивно-вентильный электродвигатель, с блоком коммутации; 8-блок драйверов для управления микропроцессорной системой управления; 9-пульт управления генератором; 10-микропроцессорная система управления; 11-ЭВМ для формирования управляющих воздействий и сбора данных; 12-ВРУ с блоками

питания и защитной автоматикой; 13-частотный преобразователь для регулирования скорости вращения генератора.

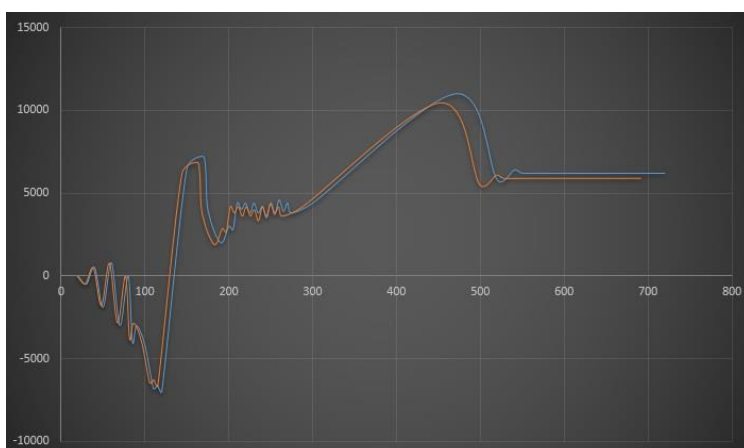
Результаты экспериментальных исследований, обработанных ЭВМ показаны на рис. 13,14,15.



*Рис.4.3.1. Результаты экспериментальных исследований независимых электромеханических систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов*



*Рис. 4.3.2. Потребление мощности двигателя, работающего в генераторном режиме*



*Рис. 4.3.3. Вырабатываемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме*

Расхождение между теоретическими и экспериментальными исследованиями не превышает 14%, что допустимо в инженерных расчетах.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность теоретических и экспериментальных исследований, и, разработанных технических решений по повышению эффективности функционирования электротехнических систем рекуперации электрической энергии электромеханических в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональных структуры и параметров систем рекуперации электрической энергии для повышения эффективности их функционирования в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, резервированием электрической энергии универсальными устройствами ее накопления и дозированным питанием, комплексно учитывающих электромагнитные и электромеханические процессы, и, функциональные связи тормозных устройств и систем движения, обеспечивающих требуемый уровень надежности, позиционирования и потребления электрической энергии.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ конструктивных схем и режимов работы электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями, расчетов их параметров, надежности работы и условий эксплуатации.

2. Разработана математическая модель электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями при различных режимах работы с резервированием электрической энергии, в комплексе учитывающей характеристики электромеханических и электромагнитных процессов.

3. Проведено исследование математической модели электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями в зависимостях которой установлены их рациональные параметры и структура.

4. Определены закономерности формирования переходных электромеханических и электромагнитных процессов в электротехнической системе рекуперации электрической энергии и управляющих воздействий в

электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей, работающих в генераторном режиме.

5. Определены структура и топология управления режимами работы в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

6. Определены рациональные параметры, требуемых уровней надежности и позиционирования в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

7. Проведены численные и экспериментальные исследования режимов работы при применении новых технических решений по системе рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах на основе реактивно-вентильных электродвигателей.

8. Разработана физическая модель системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями и стенд для физического моделирования структуры управления, проведения экспериментальных исследований на основе критериев подобия и оценке правильности разработанных технических решений по их реализации, где эффективность достигала 20-25%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами исследований составило 14%, что допустимо в инженерных расчетах.

#### **Публикации по теме диссертации:**

1. Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Высшие гармоники в сетях электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып.12. – С.11-16.

2. Авдошин В.С., Источники высших гармоник в сетях электроснабжения // VII региональная молодежная научно-практическая конференция ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Часть 1. – С.5-6.

3. Авдошин В.С., Анализ электрических потерь в вентильно-реактивном двигателе, работающем в генераторном режиме // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. – С.188-189.

4. Степанов В.М., Авдошин В.С., Анализ основных характеристик вентильно-реактивного электродвигателя, работающего в режиме генератора // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып.8. – С.181-184.

5. Авдошин В.С., Конструктивные особенности вентильно-реактивного электродвигателя, работающего в генераторном режиме в

зависимости от скорости вращения вала // X Региональная магистерская научная конференция (Россия, Тула, 18 - 22 мая 2015 года). Тула: Изд-во ТулГУ 2015– С.212-213.

6. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №168624 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Оpubл. 13.02.2017. Бюл. №5.

7. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №172453 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Оpubл. 11.07.2017. Бюл. №20.