

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образование
учреждение высшего профессионального образования
«Тульский государственный университет»

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.

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Степанов Владимир Михайлович

Тула – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ, РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ИХ НАДЕЖНОСТИ.....	13
1.1. Анализ конструктивных схем и условия их эксплуатации	13
1.2 Методы моделирования и расчета параметров.....	21
1.3. Цель и задачи исследования	38
1.4. Выводы.....	40
2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ.....	42
2.1. Разработка новых технических решений	42
2.2. Определение уровня надёжности	49
2.3 Определения условий реализуемости и показателей надёжности	53
2.4. Выводы.....	60
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РЕКУПЕРАЦИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ.....	62
3.1. Математическая модель переходных процессов в электромеханической системе	62
3.2. Формирование переходных процессов в тормозных устройствах ...	65

3.3. Моделирование переходных процессов в системе исполнительный механизм – реактивно-вентильный электродвигатель – устройство рекуперации электрической энергии	72
3.4. Разработка параметрического ряда и исследование устойчивости системы рекуперации.....	80
3.5. Выводы.....	88
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМАХ.....	90
4.1. Планирование эксперимента.....	90
4.2. Стенд, аппаратура и методика эксперимента	99
4.3. Экспериментальные исследования.....	101
4.4. Выводы	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	107

ВВЕДЕНИЕ

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 [1-20]. При зависимых электромеханических системах многодвигательных подъемно-транспортных механизмов при рекуперации электрической энергии требуется синхронизация работы электродвигателей [20]. 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% [20]. 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 [20]. 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 [21]. 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 надёжности их работы [21].

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, надёжность и эффективность электромеханических систем [21,22].

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 [21,22].

В совокупности перечисленное, снижает энергоемкость как процесса изготовления, так и функционирование многодвигательных подъемно-транспортных электромеханических систем с реактивно-вентильными электродвигателями, работающих в генераторном режиме. [21,22].

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 [23].

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 6 статьях, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патент РФ на полезную модель.

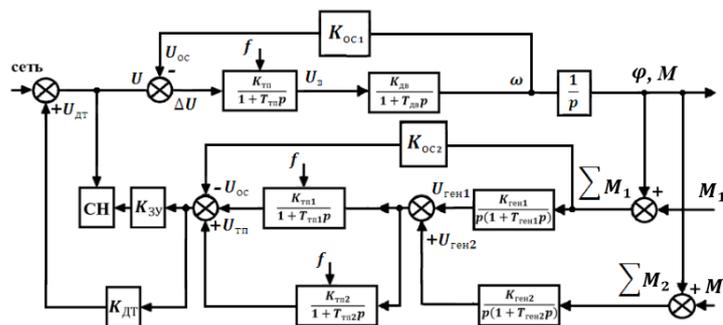
Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 97 наименования, содержит 34 рисунка и 3 таблицы. Общий объем - 118 страниц.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой «Электроэнергетика» Тульского государственного университета, доктору технических наук, профессору Степанову Владимиру Михайловичу за научные консультации, поддержку и помощь при работе над диссертацией.

1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ, РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ, МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ИХ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Анализ конструктивных схем и условия их эксплуатации

Проведенный анализ конструктивных схем показывает, что в зависимости от условий эксплуатации и поставленных задач перед системами многодвигательных подъемно-транспортных механизмов используются схемы с зависимым (рис. 1.1.1) и независимым (рис. 1.1.2) исполнением электромеханических систем [26-34].



*Рис. 1.1.1. Структурная схема для системы рекуперации
электроэнергии электромеханические система с зависимым
исполнением кинематики многодвигательных подъемно-
транспортных механизмов*

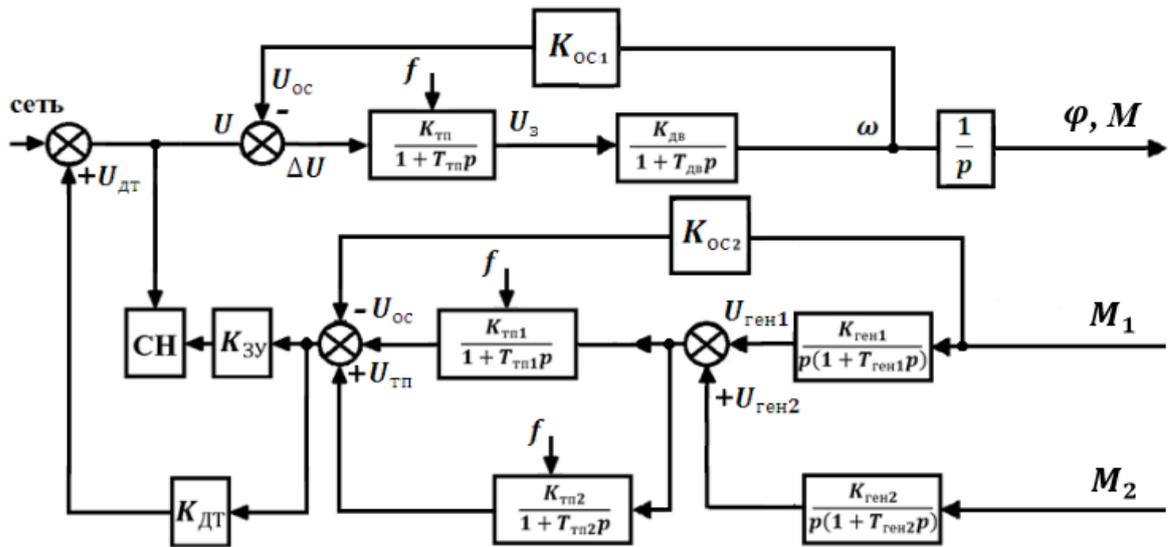


Рис. 1.1.2. Структурная схема для системы рекуперации электроэнергии электромеханической системы с независимым исполнением кинематики многодвигательных подъемно-транспортных механизмов

Работа системы рекуперации электрической энергии зависит от режимов работы электродвигателей в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах, а именно в процессе работы двигателей в генераторном режиме в момент торможения. Недостатком таких схем является использование асинхронного электродвигателя и сложность систем управления с учетом резервирования и дозированного питания электрической энергии.

Перед тормозными устройствами многодвигательных подъемно-транспортных механизмов ставят основные задачи, такие как надёжность работы и точность позиционирования. Наиболее общими конструктивными схемами тормозных устройств являются схемы тормозных устройств, оборудованных тормозными рабочими органами с поступательно движущимися колодками рис.1.1.3.

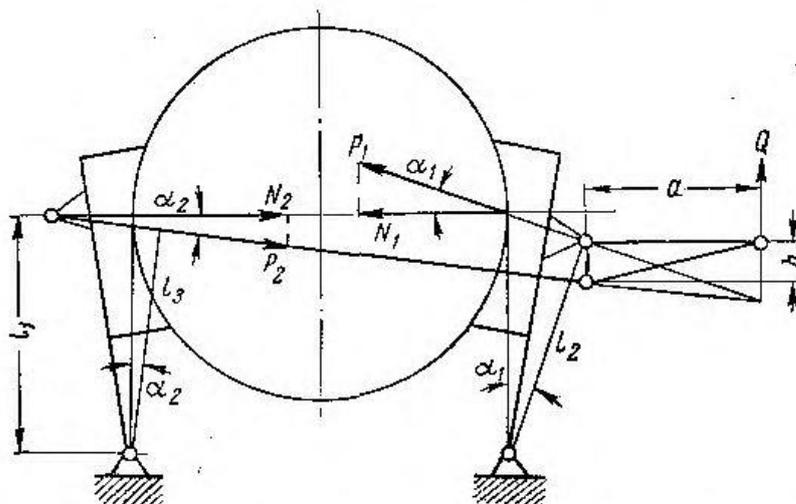


Рис. 1.1.3. Наиболее общая конструктивная схемами тормозных устройств

При работе механических тормозов их тормозные колодки подвержены повышенному износу вследствие взаимодействия с вращающимся ободом, начиная с максимальной скорости до полной остановки [21].

Данные схемы показывают, что закономерности формирования усилия торможения, не учитывают функциональные связи с управлением скорости движения объекта, и как следствие режимами работы электродвигателей необходимых для работы системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъёмно-транспортных механизмах. Функциональные связи могут так же позволить осуществлять электрическое торможение при небольшом изменении скорости движимого объекта.

Известны так же схемы многодвигательных электроприводов, в которых для накопления энергии при торможении используется понижающий преобразователь. Так на рис. 1.1.4 показана конструктивная схема многодвигательного механизма, которая содержит два тяговых

электродвигателя 3, 4 постоянного тока, выполненные с понижающим преобразователем на биполярном транзисторе с изолированным затвором 20, диоде 16, дросселе 9 и конденсаторный накопитель 19. В режиме пуска конденсаторный накопитель 19 через повышающий преобразователь, выполненный на биполярном транзисторе с изолированным затвором 17, дросселе 8 и диоде 10, отдает энергию тяговым двигателям через контактор 5, якорные обмотки 3, 4 тяговых двигателей постоянного тока, контактор 14, включенные контакторы 13, 22 реверсора, контактор 18. Преимуществом таких конструктивных схем является то, что многодвигательный электропривод обеспечивает возможность рекуперативного торможения с наилучшим использованием энергетических возможностей конденсаторного накопителя /35/.

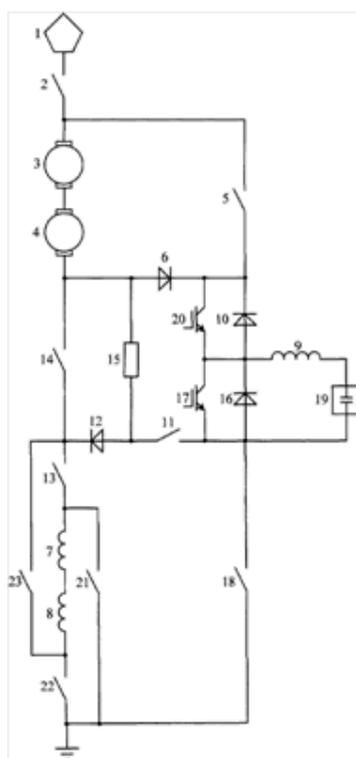


Рис.1.1.4. Конструктивная схема многодвигательного механизма

На рис.1.1.5 представлена электромеханическая схема реверсивного электропривода, которая содержит рекуперативный роторный инвертор напряжения и рекуперативный статорный инвертор напряжения. Оба преобразователя подключаются к общей обмотке согласующего трансформатора. Такая конструктивная схема обеспечивает двойное питание электродвигателя от двух источников электроэнергии за счет применения резервного устройства накопления электрической энергии, регулирующих амплитуду и частоту напряжения тока статора и тока ротора, и возможность рекуперации электрической энергии [36].

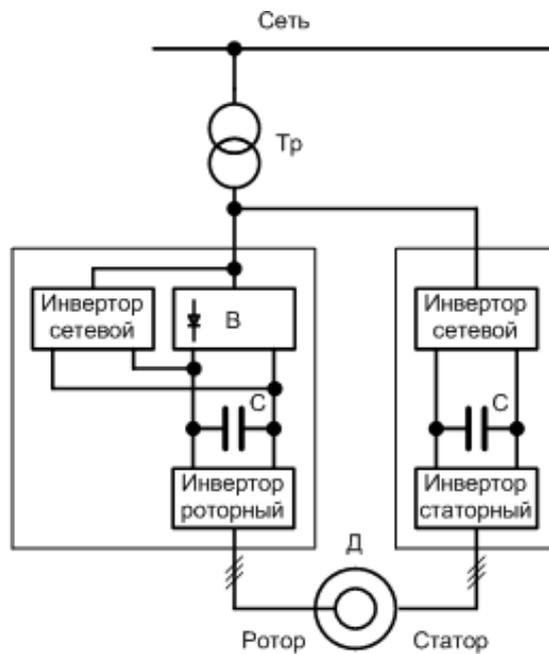


Рис. 1.1.5. Схема реверсивного электропривода с рекуперативным низковольтным инвертором в статоре и рекуперативным низковольтным инвертором в роторе

Недостатками таких конструктивных схем является отсутствие дозированного электропитания от сети для питания собственных нужд.

Таким образом, во всех случаях отсутствует комплексная система тормозных связей с системой управления движения, и не учитывается

взаимное влияние точности позиционирования системы торможения и скорости движения объекта, что снижает надежное функционирование. Использование реактивно-вентильного электродвигателя в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах, позволит снизить энергоёмкость, увеличить надежность, повысить эффективность, точность позиционирования и стоимость конечного изделия. Наличие обратной связи с тормозной системой позволит увеличить КПД системы рекуперации электрической энергии.

Реактивно-вентильный электродвигатель представляет собой электромеханическую систему, состоящую из электродвигателя, вентильного коммутатора, датчика положения ротора и системы управления. Простая структура и конструкция реактивно-вентильного электродвигателя за счет безредукторного исполнения, надежных силовых электронных ключей, микропроцессорного исполнения обеспечивают технологичность и низкую стоимость электродвигателя [37-43].

В настоящее время применение классических электродвигателей доминируют в различных отраслях. Развитие силовой электроники, а особенно прогресс в области полупроводников, позволил повысить надежность системы управления и контроля работы реактивно-вентильного электродвигателя, тем самым позволив конкурировать с классическими электродвигателями. Распространенная модификация трехфазного реактивно-вентильного электродвигателя показана на рис.1.1.6.

Принципы работы реактивно-вентильного электродвигателя основаны на реактивном моменте. Электродвигатель имеет статор из зубчатых явно выраженных полюсов, с намотанными обмотками, после подачи напряжения на которые, создается крутящий момент, который стремится выровнять полюса таким образом, чтобы снизить магнитное сопротивление в цепи.

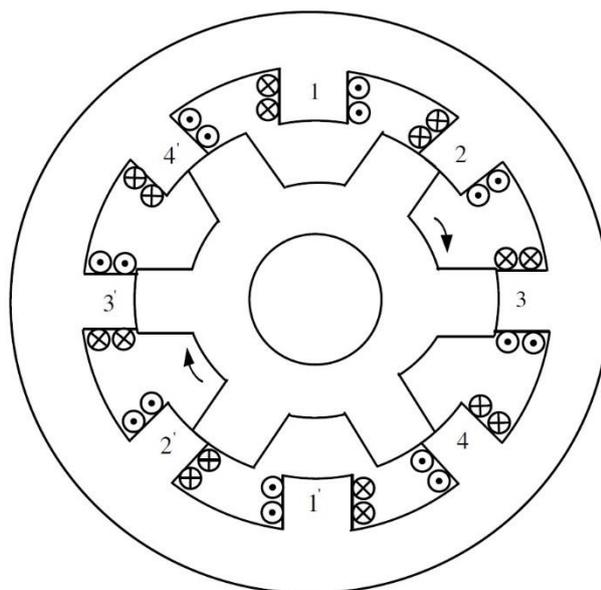


Рис. 1.1.6. Конструкция реактивно-вентильного электродвигателя

8/6

Низкая стоимость производства, высокая надежность, отсутствие щеток и постоянных магнитов, гибкая система управления, которая позволяет проводить быстрые изменения в стратегии управления, дают возможность рассматривать реактивно-вентильный электродвигатель, как альтернативу коллекторному двигателю последовательного возбуждения. Недостатками реактивно-вентильного электродвигателя являются повышенная мощность преобразователя при работе на низких частотах вращения и шум при работе.

На рис. 1.1.7. приведен обобщенная структурная блок-схема реактивно-вентильного электродвигателя, которая отражает принципиальные особенности построения и внутренние связи.

Неразрывность этих узлов принципиально отличает от других типов двигателей, имеющих в своем составе аналогичные узлы, например, синхронных реактивных двигателей, асинхронных двигателей с частотным управлением.

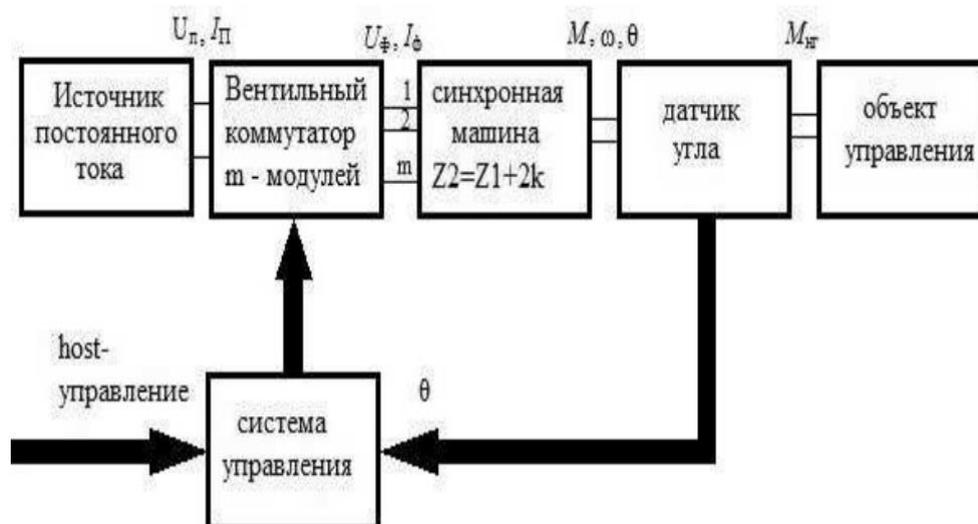


Рис. 1.1.7 - Обобщенная структурная блок-схема реактивно-вентильного электродвигателя

Высокие технические характеристики реактивно-вентильного двигателя можно получить только при комплексном рассмотрении всех составляющих, в отличие от традиционного подхода [44-46].

Проведен анализ различных систем управления реактивно вентильным-электродвигателем. Наиболее актуальным является бездатчиковая система управления представленная на рис. 1.1.8 [25]. Микропроцессорная система управления, которая анализирует изменения фазы измерительной ЭДС и определяет необходимые моменты коммутации обмоток, производит регулирование силового тока в фазных обмотках реактивно вентильного-электродвигателя, рассчитывает текущую скорость вращения ротора и производит стабилизацию скорости вращения ротора. Однако, данная система управления не учитывает работу реактивно вентильного-электродвигателя в генераторном режиме, с возможностью работы системы рекуперации.

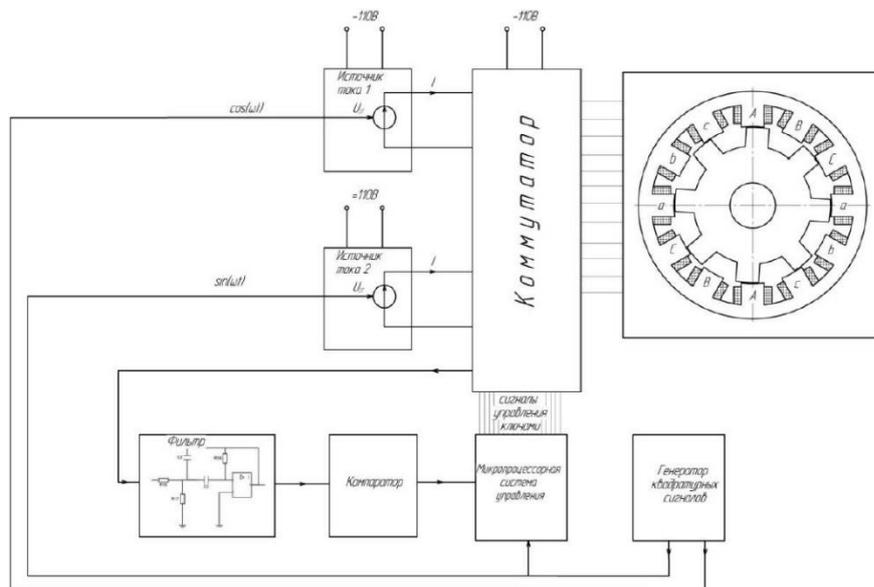


Рис. 1.1.8 – Функциональная схема бездатчикового управления реактивно вентильным-электродвигателем

1.2 Методы моделирования и расчета параметров

Математическое описание процессов, как правило рассматривается для систем с одним двигателем [47-51]. В энергоснабжение многодвигательных подъемно-транспортных механизмов силовые компоненты цепи передачи и преобразования энергии оказывают взаимное влияние, в связи с этим недопустимо использовать модели электромеханических преобразователей для однодвигательных систем [52-55]. При этом задача управления сводится к задаче формирования необходимого значения электромагнитного момента двигателя [20].

Расчетная схема системы генератор – двигатель представлена на рис.1.2.1.

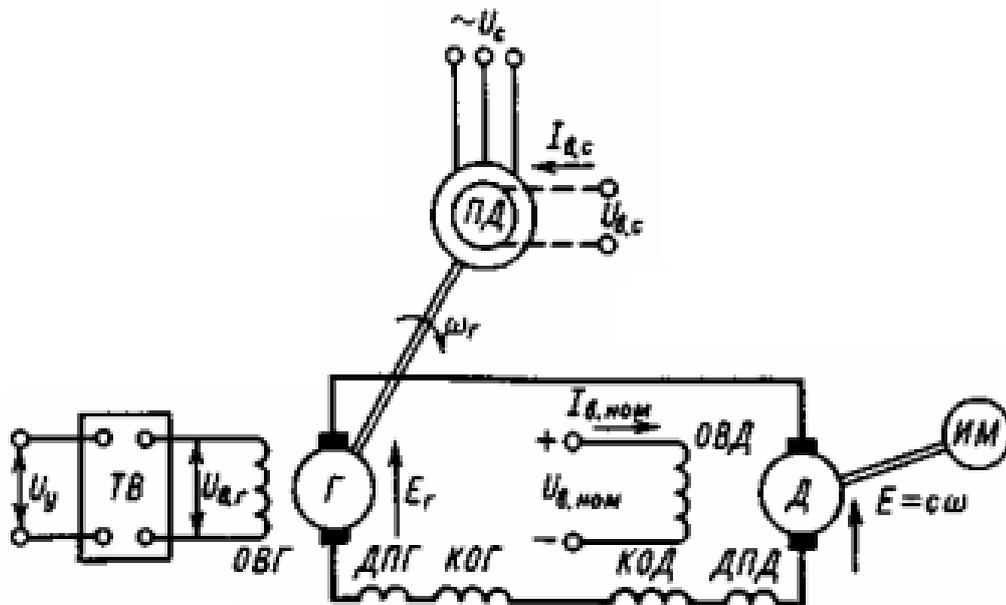


Рис.1.2.1. Расчетная схема системы генератор – двигатель

Уравнение механической характеристики электропривода, управляемого по системе генератор-двигатель можно получить с помощью уравнения электрического равновесия для якорной цепи машин /К 6/.

$$e_{\Gamma} - e = i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \quad (1.2.1)$$

где $R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{я}\Sigma\text{дв}} + R_{\text{я}\Sigma\Gamma}$ – суммарное сопротивление якорной цепи в системе генератор-двигатель;

$$R_{\text{я}\Sigma\text{дв}} = R_{\text{ядв}} + R_{\text{ДПД}} + R_{\text{КОД}}; \quad R_{\text{я}\Sigma\Gamma} = R_{\text{я}\Gamma} + R_{\text{ДПГ}} + R_{\text{КОГ}};$$

$L_{\text{я}\Sigma} = L_{\text{я}\Sigma\text{дв}} + L_{\text{я}\Sigma\Gamma}$ – суммарная индуктивность якорной цепи в системе генератор-двигатель;

$$L_{\Sigma_{\text{ДВ}}} = L_{\text{ЯДВ}} + L_{\text{ДПД}} + L_{\text{КОД}}; \quad L_{\Sigma_{\text{Г}}} = L_{\text{ЯГ}} + L_{\text{ДПГ}} + L_{\text{КОГ}};$$

Уравнение (1) можно представить в виде

$$c(\omega_0 - \omega) = R_{\Sigma} (1 + T_{\text{Я}}p)i_{\text{Я}}, \quad (1.2.2)$$

где $c = k \cdot \Phi_{\text{НОМ}}$ – коэффициент ЭДС двигателя; $\omega_0 = e_{\text{Г}}/c$ – скорость идеального холостого хода в системе генератор-двигатель;

$$T_{\text{Я}} = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}.$$

Заменяя в (1.1.2) $i_{\text{Я}}$ на $M = c \cdot i_{\text{Я}}$, получим уравнение механической характеристики в системе генератор-двигатель

$$(1 + T_{\text{Я}}p)M = \beta_c(\omega_0 - \omega), \quad (1.2.3)$$

где $\beta_c = c^2/R_{\Sigma}$ – модуль статической жесткости механической характеристики в системе генератор-двигатель.

Механическая характеристика, выражаемая уравнением (1.2.3) позволяет рассмотреть взаимосвязь параметров при установившихся режимах работы двигателя в определенных условиях работы.

Изменением ЭДС генератора $E_{\text{Г}}$ в системе генератор-двигатель обеспечивается непрерывное плавное управление моментом и скоростью электропривода во всех четырех квадрантах координат механической характеристики при неизменной жесткости $\beta_c = \text{const}$.

Основным видом возбудителей в современных системах генератор-двигатель являются тиристорные и транзисторные преобразователи, обладающие высоким быстродействием и коэффициентом усиления по мощности [27]. С учетом запаздывания и малых значений постоянных времени фильтра, динамические процессы тиристорного возбудителя описываются уравнением

$$k_{т.в} \cdot U_y = (1 + T_{т.в} \cdot p) U_{в.г} \quad (1.2.4)$$

где $k_{т.в} = U_{в.г}/U_y$ – коэффициент усиления тиристорного возбудителя по напряжению.

Для выявления основных динамических свойств системы генератор-двигатель гистерезисом можно пренебречь и для линейного участка характеристики 1 $E_{г} = f(U_{в.г})$ при $\omega_{г} = const$ линейной на основной части при ненасыщенной магнитной цепи (рис.1.2.2.) записать следующее [27]

$$k_{г} \cdot U_{в.г} = (1 + T_{г} p) e_{г} \quad (1.2.5)$$

где $k_{г} = E_{г}/U_{в.г}$ при $\omega_{г} = const$; $T_{г}$ – постоянная времени генератора.

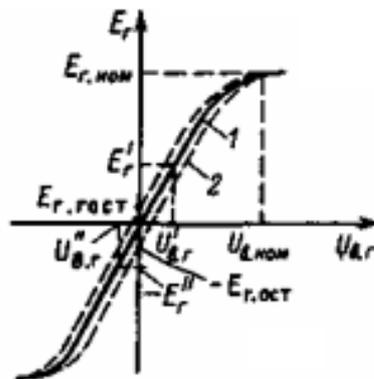


Рис.1.2.2. Характеристика $E_{г} = f(U_{в.г})$ при $\omega_{г} = const$

С учетом уравнений (1.2.1), (1.2.4), (1.2.5) и уравнения движения электропривода при $c_{12} = \infty$ в виде

$$i_{я} - \frac{M_c}{c} = \frac{cT_M}{R_{я\Sigma}} p\omega \quad (1.2.6)$$

Подъемно-транспортную установку можно представить как трехмассовую эквивалентную систему, где первая масса представляет собой вращающиеся элементы, вторая масса отображает груженный подъемный объект, третья масса отображает подъемный объект. Механические упругие связи между массами отображают канаты подъемной установки [56-59].

Трехмассовые кинематические схемы подразделяются на линейные и кольцевые. Эквивалентная расчетная схема трех-массовой линейной системы представлена на рис.1.2.1(а) Эквивалентная расчетная схема кольцевой трех-массовой системы представлена на рис.1.2.1(б). Отличием кольцевой схемы от линейной является наличие замкнутого механического контура, состоящего из трех масс, соединенных между собой упругими элементами. Линейная схема эквивалентна двух-концевой подъемной установке без хвостового каната. Кольцевая схема эквивалентна двух-концевой подъемной установке с хвостовым канатом. Исходя из простоты схемы, следует принять к более детальному рассмотрению линейную трех-массовую схему двух-концевой подъемной установки.

Уравнения механических связей устанавливают соотношения между скоростями ее элементов (уравнения Лагранжа) [60-61,26].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = Q_1$$

$$L = W_k - W_n \quad (1.2.7)$$

где: L - функция Лагранжа, разность потенциальной и кинетической энергии, выраженная через обобщенные координаты q_i и обобщенные координаты \dot{q}_i ; $Q = \delta A_i / \delta q_i$ - обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i всех действующих сил на возможное перемещение δq_i , W_k — запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i и обобщенные координаты \dot{q}_i ; W_n - запас потенциальной энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i и обобщенные координаты \dot{q}_i . Для трех-массовой ЭМС шахтной подъемной установки, представленной на рис. 1.2.1, обобщенными координатами являются угловые перемещения масс $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ им соответствуют обобщенные скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$. Для данной системы функция Лагранжа имеет вид:

$$L = W_k - W_n = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \frac{J_3 \omega_3^2}{2} - \frac{c_{21}(\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2} - \frac{c_{13}(\varphi_1 - \varphi_3)^2}{2} \quad (1.2.8)$$

Подставляя функцию Лагранжа в уравнение Лагранжа получаем математическое описание механической части линейной трехмассовой ЭМС подъемной установки:

$$\begin{aligned} M - (M_{21} - M_{13}) &= p\omega_1 J_1 \\ M_{21} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2 \\ -M_{13} - M_{c3} &= J_3 p \omega_3 \\ pM_{21} &= C_{21}(\omega_1 - \omega_2) \\ pM_{13} &= C_{13}(\omega_3 - \omega_1) \end{aligned} \quad (1.2.9)$$

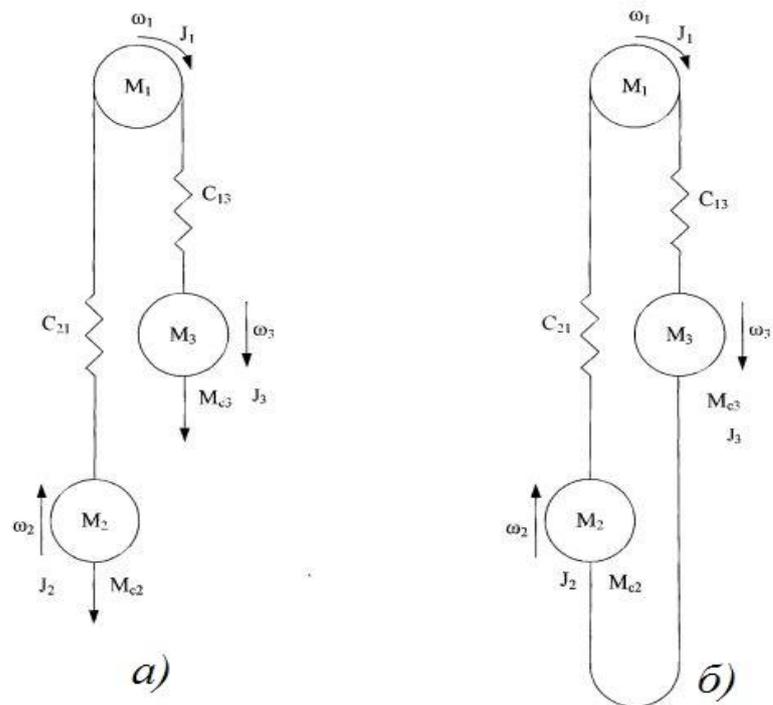


Рис. 1.2.1 Эквивалентная расчетная схема трехмассовой:

а - линейной системы; б - кольцевой системы

где: M - момент приводного двигателя; M_{21} - приведенный момент упругих сил между двигателем и груженым подъемным объектом; M_{13} - приведенный момент упругих сил между порожним подъемным объектом и двигателем J_1 - приведенный момент инерции первой массы, включая момент инерции редуктора, двигателя, органа навивки, направляющих шкивов; J_2 - приведенный момент инерции второй массы, груженого подъемного объекта; J_3 - приведенный момент инерции третьей массы, порожнего подъемного объекта; ω_1 - угловая скорость вращения двигателя; ω_2 - приведенная к угловой скорости двигателя скорость груженого подъемного объекта; ω_3 - приведенная к угловой скорости двигателя скорость порожнего подъемного объекта; M_{c2} - приведенный статический момент груженого подъемного объекта; M_{c3} - приведенный статический момент порожнего подъемного объекта; C_{21} - приведенный коэффициент

жесткости струн каната между органом навивки и груженым подъемным объектом; C_{13} - приведенный коэффициент жесткости струн каната между органом навивки и порожним подъемным объектом.

Определяется приведенный радиус вращения как отношение скорости подъемного объекта v_c к угловой скорости двигателя $\omega_{дв}$, или отношения диаметра органа навивки (барабан) D к двойному значению передаточного числа редуктора i_p :

$$q = \frac{v_c}{\omega_{дв}} = \frac{D}{2 \cdot i_p} \quad (1.2.10)$$

Определяются приведенные моменты инерции поступательно движущихся элементов установки с груженым и порожним подъемными объектами:

$$\begin{aligned} J_{n.c \text{ груз}} &= m_5 \cdot q^2 \\ J_{n.c \text{ порож}} &= m_7 \cdot q^2 \end{aligned} \quad (1.2.11)$$

Определяем приведенные коэффициенты жесткости участков каната между барабаном и шкивами:

$$C_{3-4} = C_{3-6} = \frac{C_k \cdot q^2}{l_{3-4}} \quad (1.2.12)$$

где: $C_k = E \cdot S$ - коэффициент растяжения одного метра каната;

l_{3-4} - длина каната от органа навивки (барабан) до направляющего шкива; E - модуль упругости каната; S - площадь поперечного сечения каната.

Определяем приведенные коэффициенты жесткости участков каната между шкивами и подъемными объектами:

$$C_{4-5} = \frac{C_k \cdot q^2}{l_{4-5}} \quad (1.2.13)$$

$$C_{6-7} = \frac{C_k \cdot q^2}{l_{6-7}}$$

Определяем приведенный коэффициент жесткости упругих элементов, с распределенными параметрами:

$$C_{21} = \frac{C_{3-6} \cdot C_{6-7}}{C_{3-6} + C_{6-7}}$$

$$C_{21} = \frac{\frac{C_k \cdot q^2}{l_{3-4}} \cdot \frac{C_k \cdot q^2}{l_{4-5}}}{\frac{C_k \cdot q^2}{l_{3-4}} + \frac{C_k \cdot q^2}{l_{4-5}}} = \frac{C_k^2 \cdot q^4}{C_k \cdot q^2 \cdot l_{4-5} + C_k \cdot q^2 \cdot l_{3-4}}$$

$$C_{21} = \frac{C_k \cdot q^2}{l_{4-5} + l_{3-4}} \quad (1.2.14)$$

$$C_{13} = \frac{C_{3-4} \cdot C_{4-5}}{C_{3-4} + C_{4-5}}$$

$$C_{13} = \frac{\frac{C_k \cdot q^2}{l_{3-6}} \cdot \frac{C_k \cdot q^2}{l_{6-7}}}{\frac{C_k \cdot q^2}{l_{3-6}} + \frac{C_k \cdot q^2}{l_{6-7}}} = \frac{C_k^2 \cdot q^4}{C_k \cdot q^2 \cdot l_{6-7} + C_k \cdot q^2 \cdot l_{3-6}};$$

$$C_{13} = \frac{C_k \cdot q^2}{l_{6-7} + l_{3-6}}$$

В связи с тем, что в состав данных выражений входят переменные параметры, в частности C_{4-5} и C_{6-7} , которые зависят от длин участков канатов l_{4-5} , l_{6-7} от направляющих шкивов до подъемных объектов, необходимо в уравнениях, эти участки кинематической цепи дифференцировать.

Уравнения Кирхгофа для цепей возбуждения и якоря двигателя имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_B &= i_B \cdot R_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} \\
 U_{\text{я}} &= i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\Sigma} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \cdot L_{12} \cdot i_B \\
 M &= p_{\text{п}} \cdot L_{12} \cdot i_B \cdot i_{\text{я}}
 \end{aligned}
 \tag{1.2.15}$$

но уравнения для цепи якоря есть ЭДС двигателя:

$$\omega_{\text{эл}} = L_{12} \cdot i_B = k\Phi\omega = E
 \tag{1.2.16}$$

Уравнения момента двигателя постоянного тока:

$$M = p_{\text{п}} \cdot L_{12} \cdot i_B \cdot i_{\text{я}} = k \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}} = C_e \cdot i_{\text{я}}
 \tag{1.2.17}$$

где C_e - внутренняя обратная связь двигателя по ЭДС.

С учетом всех преобразований окончательный вариант математического описания приводной части подъемных установок можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 U_B &= i_B \cdot R_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} \\
 U_{\text{я}} &= i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\Sigma} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + C_e \cdot \omega \\
 M &= C_e \cdot i_{\text{я}}
 \end{aligned}
 \tag{1.2.18}$$

Вследствие того, что ток обмотки возбуждения является постоянной величиной и в процессах регулирования не участвует, уравнение обмотки возбуждения двигателя постоянного тока в дальнейшем не рассматривается.

Совместное математическое описание приводной и механической частей подъемных установок позволяет получить окончательный вариант

математического описания многомассовой электромеханической системы подъемных установок с учетом упругих элементов:

$$\begin{aligned}
 M - (M_{21} - M_{13}) &= J_1 p \omega_1 \\
 M_{21} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2 \\
 -M_{13} - M_{c3} &= J_3 p \omega_3 \\
 pM_{21} &= C_{21}(\omega_1 - \omega_2) \\
 pM_{13} &= C_{13}(\omega_3 - \omega_1) \\
 U_{я} &= i_{я} \cdot R_{я} + L_{я} \Sigma \cdot \frac{di_{я}}{dt} + C_e \cdot \omega \\
 M &= C_e \cdot i_{я}
 \end{aligned}
 \tag{1.2.19}$$

Систему уравнений (1.2.19) можно представить в виде структурной схемы (рис. 1.2.2).

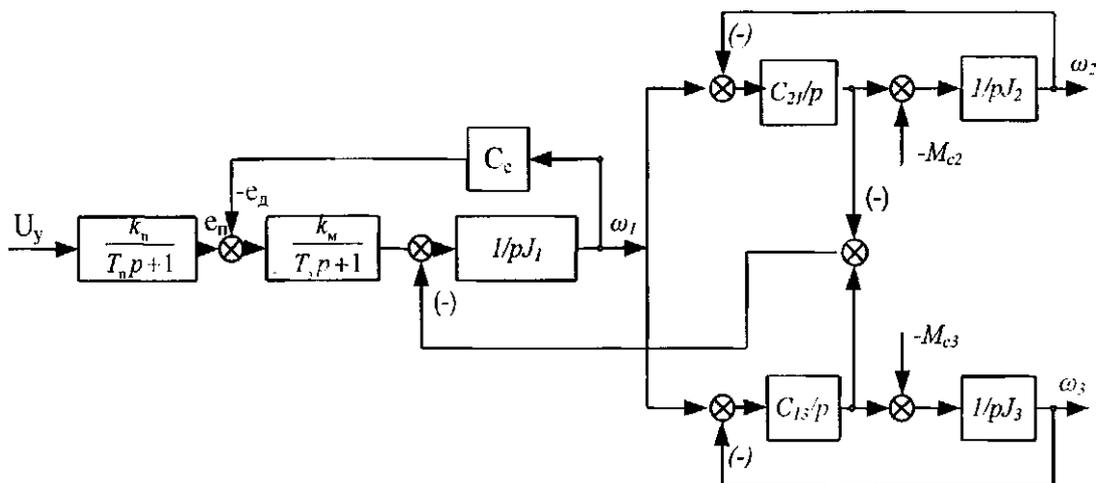


Рис. 1.2.2 - Структурная схема трехмассовой электромеханической системы подъемной установки.

Структурная схема трехмассовой электромеханической системы подъемных установок представляет собой сложный объект, состоящий из цепочки интегрирующих звеньев, замкнутых перекрестными внутренними обратными связями. В состав входит как двигатель постоянного тока, так и механическая часть подъемной установки с учетом жесткости канатов.

Преобразуем систему уравнений (1.2.19) к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 pM &= (J_1 p^2 + C_{21} + C_{13})\omega_1 - C_{21}\omega_2 - C_{13}\omega_3 \\
 pM_{c2} &= C_{21}\omega_1 + (-J_2 p^2 - C_{21})\omega_2 \\
 pM_{c3} &= -C_{13}\omega_1 + (J_3 p^2 + C_{13})\omega_3
 \end{aligned}
 \tag{1.2.20}$$

где: $M = \frac{k_M}{1+pT_3} (e_n - C_e \omega_1) = \frac{k_M e_n - k_M C_e \omega_1}{1+pT_3}$ - электромагнитный момент двигателя; k_M - коэффициент передачи звена силовой (якорной) цепи двигателя по моменту; T_3 - электромагнитная постоянная времени; e_n - ЭДС преобразователя;

Рассмотренные математические модели и методы расчета параметров электромеханического модуля учитывают закономерности формирования момента на валу электродвигателя регулирующего скорость движения подъемного объекта и не учитывают взаимосвязь между тормозным устройством и системой движения подъемного объекта, что снижает точность его позиционирования.

Тормозное устройство является основным средством защиты и управления, основной задачей расчета исполнительного органа является определение усилия, которое должен передавать тормозной привод его замыкающему шарниру для получения тормозного момента, требующегося на валу органов навивки. Одновременно с этим находят усилия, действующие в отдельных звеньях кинематической цепи исполнительного органа, для расчета их на прочность и определяют требуемые размеры тормозных колодок. При проверке существующего тормоза решается обратная задача, а именно определяется возможная величина тормозного момента при заданном усилии привода.

Тормозной момент, создаваемый исполнительным органом на валу тормозного обода, зависит от суммы сил нажатия колодок на тормозной

обод, нормальных к поверхности последнего и являющихся результирующими радиального давления каждой колодки па тормозной обод [63-67].

Этот момент в общем виде:

$$M_T = (N_1 + N_2)jR_T = \frac{0,5(N_1+N_2)}{D_T} \quad (1.2.21)$$

где N_1 и N_2 - нормальные силы нажатия передней и задней тормозных колодок на обод (при спаренном исполнительном органе N_1 и N_2 - силы нажатия двух передних и двух задних колодок); j - коэффициент трения между тормозными колодками и ободом, принимаемый согласно ПБ; R_T и D_T - радиус и диаметр тормозного обода.

Соотношение между силами нажатия N_1 и N_2 и усилием Q , передаваемым исполнительному органу тормозным приводом, зависит от кинематической схемы исполнительного органа и соотношения ее размеров.

Отношение

$$\frac{(N_1+N_2)}{Q} = i \quad (1.2.22)$$

назовем общим передаточным отношением кинематической цепи исполнительного органа; это отношение является постоянным для каждого типоразмера исполнительного органа тормоза.

Тормозной момент согласно формулам (1.2.21) и (1.2.22)

$$M_T = jR_T i Q = \frac{0,5}{D_T i Q} \quad (1.2.23)$$

Следовательно, зная общее передаточное отношение исполнительного органа, можно определить при известном усилии привода возможный тормозной момент и, наоборот, при заданном тормозном моменте определить требуемое усилие привода. Таким образом,

первоочередной задачей расчета исполнительного органа тормоза каждого типоразмера является определение общего передаточного отношения его кинематической цепи.

Приводное усилие определяется исходя из формулы (1.2.23):

$$Q = \frac{M_T}{R_T i f \eta_T} \quad (1.2.24)$$

где η_T – КПД, рычажной системы тормоза, принимаемый для простых рычажных систем 0,9, а для более сложных 0,85. При этом передаточное отношение кинематической цепи тормоза определяется приблизительно /45, 53/

Ниже приводятся метод и обоснование приближенного определения этого отношения основных видов исполнительного органа.

У исполнительного органа с угловым перемещением тормозных колодок и центральным расположением рычажной системы усилия, возникающие в рычажной системе под действием усилия, создаваемого приводом, определяют следующим образом (рис. 1.2.3):

Усилие в соединительной тяге

$$P_2 = \frac{1}{\cos \alpha_2} Q \frac{a}{b} \quad (1.2.25)$$

Так как $P_2 \cos \alpha_2 = Q \frac{a}{b}$

Усилие в опорном шарнире углового рычага, равное геометрической сумме $\bar{P}_1 = \bar{P}_2 + \bar{Q}$, может быть выражено как

$$P_1 = \frac{1}{\cos \alpha_1} Q \frac{a}{b} \quad (1.2.26)$$

Направления сил N_1 и N_2 нажатия тормозных колодок на тормозной обод обычно составляют с горизонтальной осью незначительный угол или с ней совпадают. У отечественных малых подъемных машин этот угол не

превышает $\pm 5^\circ$. Если принять, что направления сил N_1 и N_2 совпадают с горизонтальной осью то величина их из соотношения плеч тормозных балок будет $N_1 = P_1 \frac{l_2}{l_1}$ и $N_2 = P_2 \frac{l_3}{l_1}$. С некоторой погрешностью можно допустить, что $l_2 \approx l_1 \cos \alpha_1$ и $l_3 \approx l_1 \cos \alpha_2$. Тогда, подставляя в выражение для сил N_1 и N_2 знаменателя P_1, P_2, l_2 и l_3 , получаем, что:

$$N_1 = N_2 = Q \frac{a}{b} \quad (1.2.27)$$

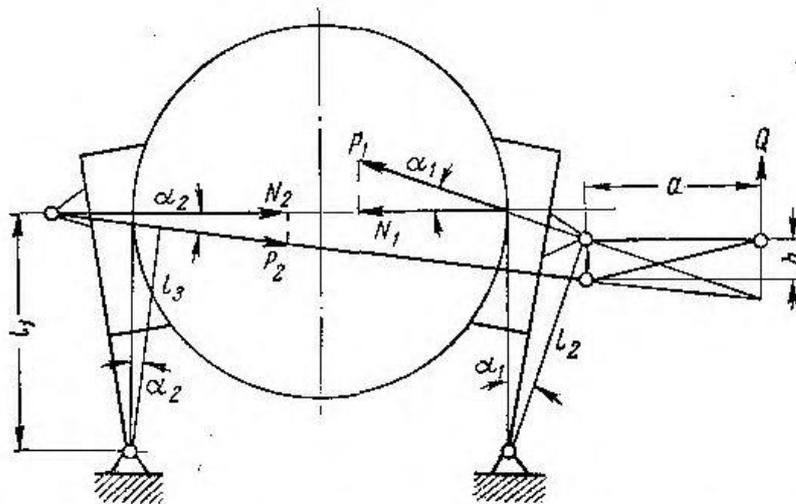


Рис. 1.2.3. Схема к определению передаточного отношения исполнительного органа тормоза с тормозными балками на неподвижных опорах

Откуда
$$i = \frac{(N_1 + N_2)}{Q} = 2 \frac{a}{b} = 2i_1$$

где i - отношение плеч углового рычага или его передаточное отношение.

Математическая модель тормозного устройства и методы расчета его параметров учитывают только закономерности формирования усилия торможения, но не учитывают функциональные связи с регулированием скорости движения подъемного объекта.

Наиболее современный подход к моделированию процессов в реактивно-вентильном электродвигателе состоит в комбинировании двух теорий, теории поля и теории цепей. К математическим моделям, использующим комбинированный метод расчета, можно отнести модели реактивно-вентильного электродвигателя, изложенные в работах [X 12, 28, 32, 36, 61]. Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в многофазном реактивно-вентильном электродвигателе позволяет выполнять расчет m -фазного электродвигателя с учетом насыщения магнитопровода, обмена реактивной энергией между фазами в различных режимах работы.

Более универсальной является модель реактивно-вентильного электродвигателя [68]. В основе модели лежат две системы уравнений: первая система уравнений описывающая электромеханические процессы

$$U_j = R\psi_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt} \quad (1.2.28)$$

где: R - фазовое сопротивление; ψ_j - потокосцепление обмоток; U_j - фазовое напряжение; i_j - фазовый ток.

Уравнение поворота ротора:

$$\begin{cases} M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{нг} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1.2.29)$$

где ω - Частота вращения; θ - угол поворота; J - суммарный момент инерции на валу привода; $M_{нг}$ - момент нагрузки; B – суммарный коэффициент трения.

Дополняется уравнениями для описания силовой части, которые для трехфазного исполнения имеют следующий вид:

$$U_{ij} = K_{ij} U_d + \sum \alpha_k \Delta U_k \quad (1.2.30)$$

вторая система уравнения электромагнитных связи $\psi_k = f(\theta, i_1, i_2, \dots, i_k)$. Для определения потокосцеплений ψ_k используется цепная схема замещения, параметры которой определяются при предварительном расчете магнитного поля методом конечного элементов. Недостатками этой модели является невозможность исследования переходных электромеханических процессов и плохая сходимость итерационного процесса в насыщенных режимах.

В общем случае, электромагнитный момент, создаваемый фазной обмоткой, можно рассчитать по форме [68]

$$M_k = \left. \frac{dW_k}{d\theta} \right|_{i_k = \text{const}} \quad (1.2.31)$$

где W_k – магнитная энергия; i_k – ток k -ой обмотки.

Такая форма имеет сложное применение в виду усложнения модели. В моделях используется упрощенная формула, полученная из (1.2.31) при отсутствии насыщения магнитной цепи.

$$M_k = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k}{d\theta} \quad (1.2.32)$$

Причем в моделях [37,42,69] формула (1.2.32) используется, только для работы двигателя с ненасыщенной магнитной цепи, а при работе двигателя с насыщением используется формула (1.2.31).

Математическую модель целесообразно выполнить на основе комбинированного подхода с учетом теории поля и управлений цепей и реализовать в математическом пакете MATLAB SIMULINK.

Стоит отметить, что в работе [25] разработан метод определения углового положения ротора вентильно-индукторной машины, основанный на

изменении магнитных проводимостей, для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС наводимой в отключенных катушках. Система управления в данном методе работает в режиме «датчика угловых положений» и двигателя одновременно. Однако в данной работе отсутствует режим генерации и резервирования электрической энергии, так как рассматривается только двигательный режим работы.

1.3. Цель и задачи исследования

В результате анализа и проведенного исследования электротехнических систем в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

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 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, требуемого уровня надежности, 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.

1.4. Выводы

1. 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.

2. 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.

3. Разработать математическую модель электротехнических систем рекуперации электрической энергии в электромеханических многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с резервированием универсальных устройств накопления электрической энергии и дозированным питанием.

4. 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.

5. 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.

2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Разработка новых технических решений

На основе проведенного анализа конструктивных схем в первой 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 [23,24].

Поставленная задача достигается таким образом, что реактивно-вентильный двигатель состоящий из безобмоточного ротора, статора, имеющего полюса с обмотками, дополнительно на которые намотаны обмотки контроля, расположенные с определенным шагом, обеспечивающие определение положение ротора вследствие изменения магнитного поля [23]. Возможно размещение независимых обмоток контроля на полюсах статора без фазной обмотки для исключения искажений [24].

На рис. 2.1.1 (с совмещенными обмотками) и рис. 2.1.2 (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.

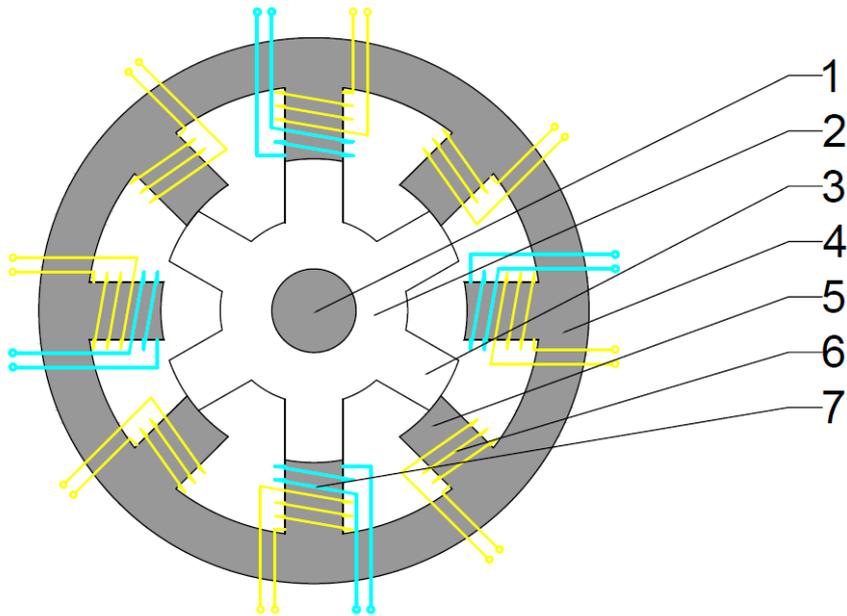


Рис. 2.1.1 - общий вид реактивно-вентильного двигателя с совмещенными обмотками.

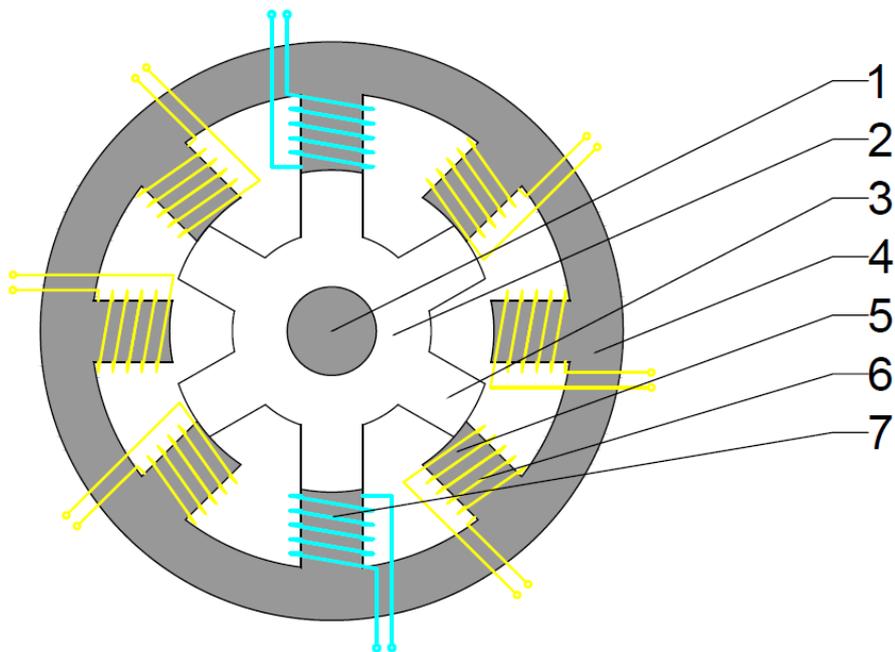


Рис. 2.1.2 - общий вид реактивно-вентильного двигателя с разделенными обмотками.

Вал 1 выполнен из немагнитного материала, безобмоточный ротор 2 выполнен из магнитомягкого материала и закреплен на валу 1, на основании

полюсов 3 ротора 2 и полюсов 5 статора 4 нарезаны дополнительные мелкие зубцы, для повышения коэффициента электромагнитной редукции, статор 4 выполнен из магнитомягкого материала имеет полюса 5, число которых не равно числу полюсов без обмоточного ротора 2. Соотношение количества полюсов у статора 5 и ротора 3 определяют по мощности генератора, согласно типоразмерному ряду и вариации скорости вращения. Каждый полюс 5 статора 4 охвачен электрически независимой фазной обмоткой 6. Обмотки контроля 7 дополнительно охватывают полюс 5 статора 4 с определенным шагом. Обмотки 6 и 7 выполняются из медной проволоки. При генерации средних и больших мощностей электрической энергии, возможны недопустимые искажения сигнала обмоток контроля 7, для исключения искажений необходимо размещение независимых обмоток контроля 7 на полюсах 5 статора 4 с определенным шагом, при этом фазную обмотку 6 с этих полюсов необходимо исключить.

При описанном конструктивном исполнении реактивно-вентильного электродвигателя, повышение эффективности функционирования системы рекуперации в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах реализуется при переходе электродвигателей в режим генерации, при этом накопителем электрической энергии служит суперконденсатор, характеристики которого позволяют накопленную энергию использовать для собственных нужд. Функциональная схема реактивно-вентильного двигателя представлена на рисунке 2.1.3.

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 [25]. Однако при работе реактивно-вентильного двигателя в режиме генератора, определение

необходимой точности положения ротора возможно только с дополнительно намотанными обмотками контроля.

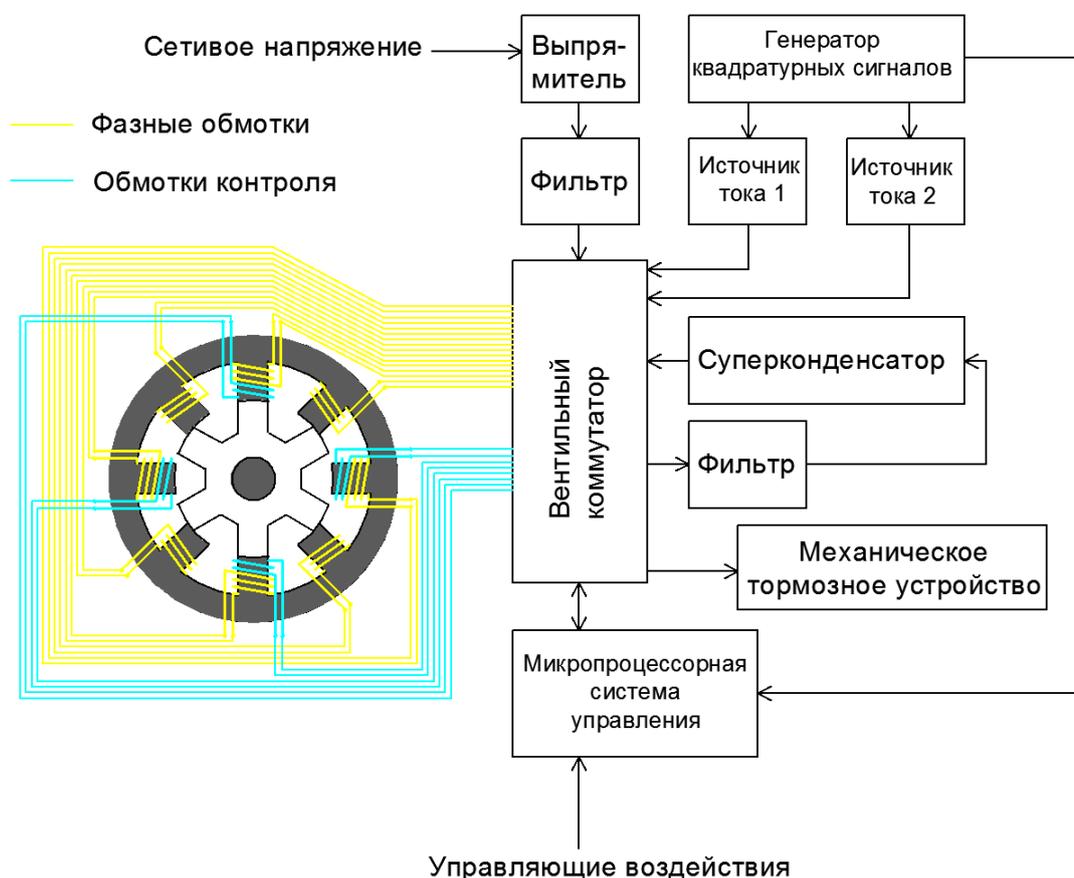


Рис. 2.1.3 – Функциональная схема реактивно-вентильного двигателя

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. [25] 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

- 5 – механическое тормозное устройство;
- 6 – суперконденсатор;
- 7 – компаратор;
- 8 – микропроцессорная система управления;
- 9 – панель управления;
- 10 – генератор квадратурных сигналов;
- 11, 12 – источники тока;
- 13 – блоки драйверов.

В многодвигательном подъёмно-транспортном механизме каждый двигатель не зависимо друг от друга может работать, как в режиме двигателя, так и генератора, при этом накопленная энергия в системе рекуперации будет расходоваться для всей системы в целом т.е. с независимым исполнением кинематики многодвигательных подъёмно-транспортных механизмов. В многодвигательном подъёмно-транспортном механизме реактивно-вентильные электродвигатели вне зависимости от режима работы двигатель/генератор постоянно работают в режиме определения положения ротора.

В режиме двигателя сетевое напряжение поступает на выпрямитель 1 для достижения требуемого значения напряжения, затем фильтр 2 сглаживает пульсации, далее питание подходит к вентильному коммутатору 3, панели управления 9 и генератору квадратурных сигналов 10. Источник квадратурных токов 10 формирует измерительные токи в обмотках контроля, связанные квадратурными соотношениями, необходимые для бездатчиковой идентификации углового положения ротора. Источник квадратурных токов состоит из двух линейных источников тока 11,12. Определение положение ротора реактивно-вентильного электродвигателя определяет микропроцессорная система управления 8 на основе

сформированных измерительных токов генератором квадратурных токов 10 и с компаратора 7 вследствие изменения магнитного потока, а, следовательно, и ЭДС в обмотках контроля. К каждой обмотки контроля подключены датчик напряжения, который измеряет напряжение на обмотке контроля. На основании положения ротора микропроцессорная система управления 8 подает сигналы на замыкание силовых ключей через блоки драйверов 13 на вентильный коммутатор 3, для подачи питания на фазные обмотки реактивно-вентильного электродвигателя 4, к которым подключены датчики тока для контроля электромагнитного момента. Электрическое торможение происходит в заданном диапазоне скорости, определяющее параметрами реактивно-вентильного электродвигателя. В случае когда скорость снижается ниже диапазона электрического торможения, либо аварийной ситуации, подается сигнал от системы управления 8 на силовой ключ вентильного коммутатора 3 для включения механического тормозного устройства 5.

Переход работы реактивно-вентильного электродвигателя 4 в режим генератора определяет микропроцессорная система управления 8 на основе сигналов от панели управления 9. Определение положения ротора происходит аналогично с режимом двигателя. На основании положения ротора микропроцессорная система управления 8 подает сигналы на замыкание силовых ключей через блоки драйверов 13 на вентильный коммутатор 3, для снятия ЭДС с фазных обмоток реактивно-вентильного электродвигателя 4 на которых магнитный поток максимален. Определение фазных обмоток, с которых необходимо снять ЭДС определяет микропроцессорная система управления 8 на основании сигналов о положении ротора и датчики напряжения на фазных обмотках. Микропроцессорная система управления 8 подает сигнал на вентильный

коммутатор 3 для подачи питания на суперконденсатор 6 через фильтр 2 для накопления электрической энергии с ее последующим использованием для питания реактивно-вентильных электродвигателей в многодвигательном подъемно-транспортном механизме. Сигнал о состоянии заряда суперконденсатора 6 поступает в микропроцессорную систему управления 8 посредством датчиков напряжения суперконденсатора, которая в свою очередь определяет источник питания в конкретный момент времени от сети или системы рекуперации электрической энергии. Таким образом система рекуперации электрической энергии в многодвигательном подъемно-транспортном механизме позволяет генерируемую электрическую энергию использовать для всей системы многодвигательных реактивно-вентильных электродвигателей.

Стоит учитывать, что скорость обработки сигналов о положении ротора, для включения фазных обмоток, микропроцессорной системой управления должна обеспечивать функционирование реактивно-вентильного электродвигателя, работающего как в режиме двигателя, так и в режиме генератора без возможности проскальзывания ротора.

2.2. Определение уровня надёжности

Для определения рациональных параметров многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями по критерию надёжности необходимо рассчитать требуемый уровень.

Из целевого назначения электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями следует, что система \sum_1 существующего (С) технического уровня рассматривается по отношению к новому (Н)

техническому уровню системы \sum_2 по зависимостям потенциальной реализуемости, определяя соотношения соответствия уровня ее надёжности техническому уровню разрабатываемой системы [79].

Новый технический уровень системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями может определяться коэффициентом технического уровня:

$$k_y = \frac{1}{5} \left(\frac{C_c}{C_H} + \frac{k_{зкс}}{k_{зкн}} + \frac{k_{скс}}{k_{скн}} + \frac{T_c}{T_H} + \frac{E_c}{E_H} \right), \quad (2.2.1)$$

где соответственно C_c и C_H – структурная жесткость электропривода; $k_{зкс}$ и $k_{зкн}$ – коэффициент затухания колебаний в электромеханической системе; $k_{скс}$ – структурный коэффициент существующего реактивно-вентильного электродвигателя; $k_{скн}$ – структурный коэффициент нового технического решения учитывающий количество элементов входящих в реактивно-вентильный электродвигатель и его габариты; T_c и T_H – коэффициент точности позиционирования; E_c и E_H коэффициент энергоёмкости электромеханической системы;

Требуемый уровень надёжности электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями определяет вероятность отказа, соответствующая требуемому техническому уровню:

$$q_H = \frac{q_c}{k_y}, \quad (2.2.2)$$

где q_c и q_H – вероятность отказа.

Исходя из структуры взаимоувязанных механизмов системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями и равной вероятности отказа, по

общеизвестным зависимостям структурной надёжности устанавливаются вероятность отказа $q_{\text{НМ}}$ [80-82]

$$q_{\text{НМ}} = q_{\text{Н}}(\Phi_i), \quad (2.2.3)$$

где $q_{\text{Н}}(\Phi_i)$ – вероятность отказа функциональных механизмов электромеханической системы, определяется из $q_{\text{Н}}$ конструктивной структуры взаимосвязанных механизмов.

Подставляя выражение (2.2.1) в (2.2.2) получим:

$$q_{\text{Н}} = \frac{q_{\text{с}}}{\frac{1}{5} \left(\frac{C_{\text{с}}}{C_{\text{Н}}} + \frac{k_{\text{зкс}}}{k_{\text{зкн}}} + \frac{k_{\text{скс}}}{k_{\text{скн}}} + \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{Н}}} + \frac{E_{\text{с}}}{E_{\text{Н}}} \right)}, \quad (2.2.4)$$

Расчет уровня показателей надёжности ведется по следующим зависимостям.

Вероятность безотказной работы

$$P_{\text{НМ}}(t) = 1 - q_{\text{НМ}}(t), \quad (2.2.5)$$

Подставляя выражение (2.2.4) в (2.2.5) получим:

$$P_{\text{Н}} = \frac{q_{\text{с}}}{\frac{1}{5} \left(\frac{C_{\text{с}}}{C_{\text{Н}}} + \frac{k_{\text{зкс}}}{k_{\text{зкн}}} + \frac{k_{\text{скс}}}{k_{\text{скн}}} + \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{Н}}} + \frac{E_{\text{с}}}{E_{\text{Н}}} \right)}. \quad (2.2.6)$$

Требуемое время безотказной работы

$$t_{\text{НМ}} = \frac{q_{\text{НМ}}}{\lambda_{\text{НМ}}}, \quad (2.2.7)$$

где $\lambda_{\text{НМ}}$ – допустимая интенсивность отказов.

Затраты на надежность [82]

$$C_{\text{НМ}} = C_{\text{СМ}} \left(\frac{q_{\text{СМ}}}{q_{\text{НМ}}} \right)^{k_y}, \quad (2.2.8)$$

ИЛИ

$$C_{\text{НМ}} = C_{\text{СМ}} \left(\frac{\lambda_{\text{СМ}}}{\lambda_{\text{НМ}}} \right)^{k_y}, \quad (2.2.9)$$

откуда

$$\lambda_{\text{НМ}} = \lambda_{\text{СМ}} \left(\frac{C_{\text{СМ}}}{C_{\text{НМ}}} \right)^{\frac{1}{k_y}}. \quad (2.2.10)$$

Коэффициент готовности

$$k_{\text{ГНМ}} = \frac{T_{\text{ОНМ}}}{T_{\text{ОНМ}} + T_{\text{ВНМ}}}, \quad (2.2.11)$$

где

$$T_{\text{ОНМ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{НМ}}}, \quad (2.2.12)$$

$$T_{\text{ВНМ}} = \frac{t_{\text{ДП}}}{q_{\text{НМ}}}, \quad (2.2.13)$$

$T_{\text{ОНМ}}$ и $T_{\text{ВНМ}}$ – требуемые соответственно средние время наработки на отказ и время восстановления; $t_{\text{ДП}}$ – допустимое время простоя.

Требуемое значение коэффициента технического использования за один и тот же период эксплуатации

$$k_{\text{ТИНМ}} = \frac{k_{\text{ГНМ}}}{1 + k_{\text{ГНМ}} \frac{t_{\text{ДП}}}{t_{\text{НМ}}}}. \quad (2.2.14)$$

Вероятность безотказной работы с учетом восстанавливаемости [82]

$$P_{\text{НМ}} = e^{-\left[\frac{1 - V_{\text{НМ}}(t_{\text{ДП}})}{T_{\text{ОНМ}}} t_{\text{НМ}} \right]}, \quad (2.2.15)$$

$$V_{\text{НМ}}(t_{\text{ДП}}) = 1 - e^{-\frac{t_{\text{ДП}}}{T_{\text{ОНМ}}}}, \quad (2.3.16)$$

ИЛИ

$$P_{\text{НМ}}(v) = e^{-\left(1 - q_{\text{НМ}} e^{-q_{\text{НМ}}}\right)}, \quad (2.2.17)$$

Экономический показатель надёжности

$$k_{\text{пэм}} = \frac{C_{\text{инм}} + C_{\text{фнм}}}{T_{\text{энм}}}, \quad (2.2.18)$$

где $C_{\text{инм}}$ – стоимость изготовления; $C_{\text{фнм}}$ – затраты на эксплуатацию; $T_{\text{энм}}$ – период эксплуатации.

Коэффициент эксплуатационных издержек

$$k_{\text{из}} = \frac{C_{\text{инм}}}{C_{\text{инм}} + C_{\text{фнм}}} < 1, \quad (2.2.19)$$

Из зависимостей (2.2.1) – (2.2.19) следует, что уровень надёжности многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями определяется надёжностью работы конструкционных материалов и их элементов $q_{\text{нк}}$ и функциональной надёжностью $q_{\text{нф}}$, которые устанавливаются из условия равной вероятности отказа.

2.3 Определения условий реализуемости и показателей надёжности

При применении многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями возникновение отказов связано с вероятностью появления свойственных им условий эксплуатации:

$$P_{\text{ук}}(t) \leq \frac{t_{\text{двк}}}{T_{\text{онм}}} \quad (2.3.1)$$

$$P_{\text{ут}}(t) \leq \frac{t_{\text{двт}}}{T_{\text{онм}}} \quad (2.3.2)$$

где $t_{\text{двк}}$ и $t_{\text{двт}}$ – допустимое время восстановления многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными

электродвигателями, определяемое соответственно свойствами и условиями работы конструкционных материалов и соответствием их параметров условиям эксплуатации; $P_{yк}(t)$ - вероятность появления условий работы конструкционных материалов, приводящих к разрушению, износу и деформации элементов; $P_{yт}(t)$ - вероятность появления условий работы, приводящих к снижению эффективности его эксплуатации или простоям из-за неполного соответствия параметров условиям эксплуатации.

Поскольку простой в данном случае, связан с допустимым временем замены многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, то исходя из условия равной вероятности

$$P_y(t) \leq \frac{t_{дп}}{T_{онм}} \quad (2.3.3)$$

Элементы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями работают в условиях циклической переменной загрузки, разрушение которых происходит при равенстве произведенной внутренней работы A_H , необходимой для разрушения

$$A_H = k_{ин} \Delta A, \quad (2.3.4)$$

где $k_{ин}$ – наибольшее число циклов нагружения элементов; ΔA – внутренняя работа, совершаемая за один цикл переменной нагрузки.

Вероятность безотказной работы зависит от величины остаточного запаса энергии A_{O3} , который можно еще израсходовать при периодических нагрузках [82]

$$P(N) = \frac{A_{O3}}{A_H} = \frac{A_H - k_{ин} \Delta A}{A_H}, \quad (2.3.5)$$

поэтому, имеем

$$k_{\Pi} k_{\text{н}} \Delta A \leq A_{\text{н}}, \quad (2.3.6)$$

Внутренняя работа $A_{\text{н}}$ может быть выражена как

$$A_{\text{н}} = k_{\Pi} \pi \frac{F_{\text{д}}^2}{E}, \quad (2.3.7)$$

$$\Delta A = \pi \frac{F_{\text{д}}^2}{E}, \quad (2.3.8)$$

k_{Π} – коэффициент перегрузки, учитывающий изменение нагрузки; E – модуль деформации; $F_{\text{д}}$ – действующая на элементы конструкции.

$$F_{\text{д}} \frac{k_{\Pi}}{k_m k_0} \leq F_{\text{н}};$$

$$k_{\text{н}} = \frac{k_{\Pi}}{k_0 k_m} \quad (2.3.9)$$

k_m – коэффициент условий работы, учитывающий изменение нагрузки; k_0 – коэффициент однородности конструкционных материалов, учитывающий изменение его механических свойств; $F_{\text{н}}$ – нормативная нагрузка на элементы конструкции.

Зависимости (2.3.9) справедливы для установившегося режима работы электромеханической системы, условие конструкционной надёжности с учетом динамических процессов имеет следующий вид

$$\frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_0^2} F_{\text{д}}^2 \leq F_{\text{н}}^2, \quad (2.3.10)$$

где коэффициент надёжности (запаса) по конструкционному материалу

$$k_{\text{н}} = \frac{k_{\Pi}^{3/2}}{k_m k_0}, \quad (2.3.11)$$

$$k_{\Pi} = \frac{F_{\text{дн}}}{m_{\text{дн}}}, \quad (2.3.12)$$

$F_{\text{дн}}$ – наибольшее значение действующей нагрузки; $m_{\text{дн}}$ – математическое ожидание случайных величин действующих нагрузок, равное средней величине $F_{\text{дср}}$;

$$k_m = 1 - P_y(t). \quad (2.3.13)$$

Учитывая, что [83]

$$k_{\text{ин}} = \frac{1}{\lambda_{\text{нм}}}, \quad (2.3.14)$$

имеем с учетом (2.3.4)

$$A_{\text{ннб}} = \frac{\pi F_{\text{днб}}^2}{\lambda_{\text{нм}} E}, \quad (2.3.15)$$

$$m_{\text{ан}} = \frac{\pi m_{\text{дн}}}{\lambda_{\text{нм}} E}, \quad (2.3.16)$$

$$k_{\text{н}} = \frac{A_{\text{ннб}}}{m_{\text{ан}}}. \quad (2.3.17)$$

Тогда из зависимости (2.3.11) получим

$$k_o = \frac{k_{\Pi}^{3/2}}{k_{\text{н}} k_m} = \frac{\sqrt{k_{\Pi}^3}}{k_{\text{н}} k_m}, \quad (2.3.18)$$

Установлено, что случайная величина действующей нагрузки на электротехнические устройства коммутации системы распределения электрической энергии может подчиняться нормальному закону распределения или закону распределения Вейтбула – закону Релея.

Для законов распределения случайных величин нагрузок имеем равенство

$$P_{\text{НМ}}(F_{\text{Н}} > m_{\text{ДН}}) = 1 - q_{\text{НМ}}, \quad (2.3.19)$$

На основании, которого, в общем

$$F_{\text{Н}} = k_{\text{Н}} \cdot F_{\text{ДНБ}} \quad (2.3.20)$$

Условием реализуемости надёжности в этом случае является неравенство (2.3.10).

Из диаграммы нагружения по $A_{\text{Н}}$ и $k_{\text{О}}$, и $k_{\text{Н}}$ выбирается конструкционный материал для элементов многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями.

Поскольку $k_{\text{ИН}}$ получается путём периодической нагрузки с частотой f_{N} , то срок службы t_{N} получим из равенства [82]

$$\ln F_{\text{ДНБ}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{A_{\text{ННБ}} E}{\pi} \right) - \frac{1}{2} \ln t_{\text{N}} - \frac{1}{2} \ln t_{\text{НМ}}, \quad (2.3.21)$$

$$f_{\text{N}} = \frac{1}{q_{\text{НМ}}}, \quad (2.3.22)$$

а решение (2.3.21) относительно t_{N} с учётом

$$q_{\text{НМ}} = \frac{\pi \cdot F_{\text{ДНБ}}^2}{A_{\text{ННБ}} E} \cdot f_{\text{N}} \cdot t_{\text{N}}, \quad (2.3.23)$$

получим

$$t_{\text{N}} = \frac{t_{\text{НМ}}}{q_{\text{НМ}}}. \quad (2.3.24)$$

Зависимости (2.3.1) – (2.3.24) устанавливают условия реализуемости надёжности элементов многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, определяемое свойствами и условиями работы их конструкционных материалов.

Условие реализуемости надёжности элементов многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными

электродвигателями, определяемое соответствием их параметров условиям эксплуатации

$$P_{yT}(t) \leq q_{HM}, \quad (2.3.25)$$

тогда

$$\frac{t_{дп} T_{oc}}{T_{OH}^2} \leq q_{HM}. \quad (2.3.26)$$

Функциональные параметры определяются на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH}

$$q_{HM} = \left(\frac{k_y C_c q_c^{k_y}}{C_{удн}} \right)^{\frac{1}{k_y + 1}} \quad (2.3.27)$$

где C_c – затраты на обеспечение надёжности элементов; $C_{удн}$ – допустимые затраты (потери - ущерб) от отказа элементов

$$C_{удн} = C_{дпн} t_{дп}, \quad (2.3.28)$$

где $C_{дпн}$ – допустимые затраты в единицу времени от отказа элементов;

$$C_{дпн} = \frac{C_{дпс}}{k_y}, \quad (2.3.29)$$

Логарифмируя выражение (2.3.27) и решая уравнение относительно $C_{удн}$, получим

$$C_{удн} = \frac{k_y C_c q_c^{k_y}}{q_{HM}^{k_y + 1}}, \quad (2.3.30)$$

тогда из (2.3.28)

$$t_{дп} = \frac{C_{удн}}{C_{дпн}} \quad (2.3.31)$$

Используя отношение (2.3.31), определяются значения $T_{\text{ВНМ}}$ (2.3.13), $k_{\text{ТИНМ}}$ (2.2.14), $P_{\text{нм}}(V)$ (2.2.15) и $V_{\text{нм}}(t_{\text{оп}})$ (2.2.16).

Для определения показателей надёжности использовались зависимости (2.2.1) – (2.3.31).

Из зависимости (2.3.19) и общеизвестных формул теории вероятности и математической статистики установлен диапазон измерений $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{н}}$. Причем, с учетом выражений (2.3.22), (2.3.24) и решая систему уравнений (2.3.21) и (2.3.23) рассчитывались величины $F_{\text{днб}}$ и $A_{\text{ннб}}$.

На основании норм трудоемкости и стоимостных показателей по зависимостям (2.3.14) и (2.3.31) соответственно определялись значения $\lambda_{\text{нм}}$ и $t_{\text{дп}}$, в данном случае $T_{\text{ВНМ}} = t_{\text{дп}}$, устанавливались значения $T_{\text{енм}}$, $k_{\text{Гнм}}$ и $k_{\text{ТИНМ}}$ а из условия (2.3.4) $P_y(t)$ с учетом t_{pi} .

По зависимостям (2.3.13), (2.3.18) и (2.3.20) рассчитывались значения k_m , k_o , и F_n .

Исходя из структуры взаимосвязанных элементов и устройств электромеханической системы многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями и равной вероятности отказов по общеизвестным зависимостям структурной надёжности, устанавливается требуемая их вероятность отказов $q_{ii} = q_i(\Phi_i)$ и уровень показателей (табл. 2.3.1)

Таблица 2.3.1

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

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

2.4. Выводы

1. Разработаны новые технические решения системы рекуперации электрической энергии в многодвигательном подъемно-транспортном механизме с реактивно-вентильными электродвигателями.

2. Установлены зависимости для расчета уровня показателей надёжности и определены условия реализуемости надёжности, определяемые свойствами и условиями работы многодвигательных подъемно-транспортных механизмы с реактивно-вентильными электродвигателями, для реализации математической модели.

3. На основе установленных зависимостей определены показатели надёжности $q_{нм}$ – вероятность безотказной работы; $t_{нм}$ – требуемое время безотказной работы; $\lambda_{нм}$ – допустимая интенсивность отказов; $T_{онм}$ – требуемое среднее время наработки на отказ; $t_{дп}$ – допустимое время простоя; $K_{знм}$ – коэффициент готовности; $k_{минм}$ – требуемое значение коэффициента технического использования; k_n – коэффициент перегрузки, учитывающий изменение нагрузки от номинальной; K_n – коэффициент надёжности (запаса) по конструкционному материалу; k_m – коэффициент

условий работы, учитывающий изменение нагрузки; k_0 – коэффициент однородности конструкционных материалов, учитывающий изменение ее механических свойств.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РЕКУПЕРАЦИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

3.1. Математическая модель переходных процессов в электромеханической системе

Математическую модель многодвигательного подъемно-транспортного механизма целесообразно разделить на модули, математическую модель реактивно-вентильного электродвигателя и систему торможения.

Многодвигательный подъемно-транспортный механизм представляет собой сложную электромеханическую систему. Как правило подъемно-транспортный механизм имеет такие виды движения как: подъем и опускание груза, движение состава. Все виды движения могут происходить как совместно, так и по отдельности. Такую систему можно представить, как трехмассовую систему, где первая масса представлена электроприводом, вторая масса представлена грузным подъемным объектом, а третья масса представлена не грузным подъемным объектом [70]. Для трехмассовой электромеханической системы подъемной установки, представленной на рис. 3.1.1, обобщенными координатами являются угловые перемещения масс $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ им соответствуют обобщенные скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ Таким образом функция Лагранжа имеет вид:

$$L = W_k - W_n = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \frac{J_3 \omega_3^2}{2} - \frac{c_{21}(\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2} - \frac{c_{13}(\varphi_1 - \varphi_3)^2}{2}. \quad (3.1.1)$$

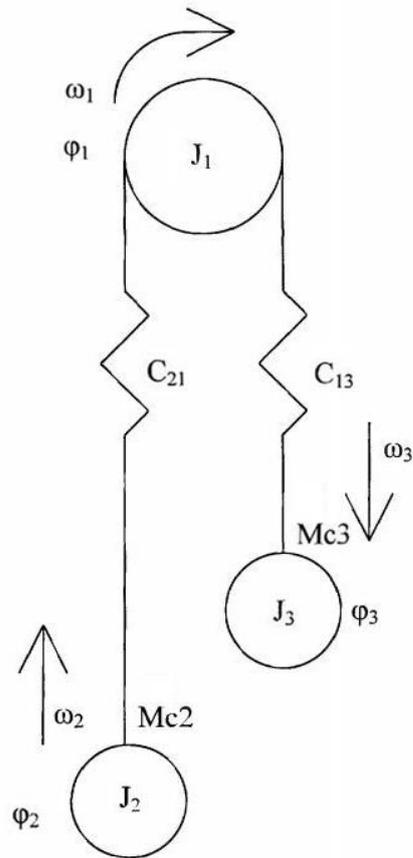


Рис. 3.1.1 Эквивалентная расчетная схема трехмассовой электромеханической системы подъемной установки.

При подстановке в уравнение Лагранжа функцию Лагранжа, получаем математическое описание механической части линейной трехмассовой электромеханической системы подъемной установки:

$$\begin{aligned}
 M - (M_{21} - M_{13}) &= J_1 p \omega_1 \\
 M_{21} - M_{c2} &= J_2 p \omega_2 \\
 -M_{13} - M_{c3} &= J_3 p \omega_3 \\
 p M_{21} &= C_{21} (\omega_1 - \omega_2) \\
 p M_{13} &= C_{13} (\omega_3 - \omega_1)
 \end{aligned}
 \tag{3.1.2}$$

Использование уравнений Кирхгофа позволяет описать систему электромагнитных процессов в реактивно-вентильном электродвигателе. Уравнение фазового направления для j -ой фазы имеет вид:

$$U_j = R \cdot i_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt}, \quad (3.1.3)$$

где: R - фазовое сопротивление; Ψ_j - потокосцепление; U_j - фазовое напряжение; i_j - фазовый ток.

Потокосцепление вводится в качестве дополнительных переменных, устанавливающих необходимую связь между токами и индуктивностями обмоток двигателя.

$$\Psi_j = L_j(\theta) i_j. \quad (3.1.4)$$

где $L_j(\theta)$ - собственная индуктивность обмотки j -ой фазы; θ - угол поворота ротора.

При отсутствии насыщения магнитной цепи электромагнитный момент реактивно-вентильного электродвигателя определяется выражением:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m i_j^2 \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} \quad (3.1.5)$$

Уравнение равновесия моментов на вал привода.

$$\begin{cases} M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{\text{нг}} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3.1.6)$$

где ω - частота вращения; θ - угол поворота; J - суммарный момент инерции на валу привода; $M_{\text{нг}}$ - момент нагрузки; B - Суммарный коэффициент трения.

3.2. Формирование переходных процессов в тормозных устройствах

Управление тормозными устройствами в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями происходит посредством электрического торможения. Таким образом управление электрическим торможением осуществляется системой управления реактивно-вентильного электродвигателя, с учетом создаваемого момента на валу и электромеханических характеристик двигателя. Однако при движении подъема и опускания объекта, требуется соблюдать требования правила безопасности [73] и правила технической эксплуатации [74]. Применение электрического торможения в различных условиях эксплуатации может не соответствовать данным требованиям. В связи с этим тормозной момент должен быть достаточным для быстрой и безопасной остановки системы в любых возможных рабочих и аварийных режимах. Для соблюдения этих условий тормозному устройству с тормозными колодками необходимо создавать несколько расчетных тормозных моментов.

При расчете тормозных моментов необходимо соблюдать:

Предохранительный (а при необходимости и рабочий) тормоз должен обеспечивать:

$$M_T \geq 3M_{ст}, \quad (3.2.1)$$

где $M_{ст}$ - статический момент при подъеме или спуске расчетного груза, при углах менее 30°

$$M_T \geq (1,8 - 3)M_{ст}, \quad (3.2.2)$$

Статический момент:

При тяжелом упругом элементе (расчетный случай - грузеный объект в верхнем положении)

$$M_{\text{ст}} = g[Q + (n_x p_x - np)H]. R_{\text{б}}. \quad (3.2.3)$$

При легком упругом элементе (грузеный объект в нижнем положении)

$$M_{\text{ст}} = g[Q - (n_x p_x - np)H]. R_{\text{б}}. \quad (3.2.4)$$

При системе с противовесом вместо Q следует принять $Q/2$.

При перестановке холостого барабана тормозное устройство должно развивать на одном тормозном шкиве тормозной момент $M_T > 1,2M_{\text{ст}}$ одной ветви упругого элемента, который создается массой подъемного объекта и отвеса [75];

$$M_T' \geq 1,2\gamma M_{\text{ст}}'. \quad (3.2.5)$$

где при раздельном для каждого барабана приводе $\gamma = 1$, при общем приводе для двух барабанов $\gamma = 2$;

$$M_{\text{ст}}' = g[Q' + pN]. R_{\text{б}}. \quad (3.2.6)$$

При предохранительном торможении ($\alpha \geq 30^\circ$) должно быть обеспечено замедление не ниже $1,5 \text{ м/с}^2$ при спуске расчетного груза и не более 5 м/с^2 при его подъеме.

В установках со шкивами трения замедление в этих случаях не должно вызывать проскальзывания упругих элементов на шкиве.

Необходимый тормозной момент определяется из уравнения движения при выключенном двигателе

$$M_T \pm M_{\text{ст}} - J\varepsilon = 0, \quad (3.2.7)$$

где знак « + » соответствует подъему груза, знак « - » - спуску.

Подставляя выражения момента инерции $J = mR_6^2$, приведенной массы m , углового замедления $\varepsilon = a/R_6$, получим

$$M_T = amR_6 \pm M_{ст} \quad , \quad (3.2.8)$$

где знак « - » соответствует подъему груза; знак « + » - спуску.

При спуске груза ($a \geq 1,5 \text{ м/с}^2$) момент торможения должен удовлетворять условию

$$M''_T \geq 1,5mR_6 \pm M''_{ст}, \quad (3.2.9)$$

где $M''_{ст} = g[(2-k)Q \pm (n_x p_x - np)H] R_6$.

При подъеме ($a \leq 5 \text{ м/с}^2$)

$$M'''_T \leq 5mR_6 - M'''_{ст}, \quad (3.2.10)$$

где $M'''_{ст} = g[kQ \pm (n_x p_x - np)H] R_6$.

В качестве расчетного тормозного момента принимают $M_{тр}$, удовлетворяющий условию

$$M \leq M_{тр} \leq M'''_{ст}. \quad (3.2.11)$$

где M - любой из тормозных моментов.

Тормозной момент, создаваемый исполнительным органом на валу тормозного обода, зависит от суммы сил нажатия колодок на тормозной обод, нормальных к поверхности последнего и являющихся результирующими радиального давления каждой колодки на тормозной обод [41,62,76].

Этот момент в общем виде:

$$M_T = (N_1 + N_2)jR_T = \frac{0,5(N_1+N_2)}{D_T}, \quad (3.2.12)$$

Соотношение между силами нажатия N_1 и N_2 и усилием F_a , передаваемым исполнительному органу тормозным приводом, зависит от кинематической схемы исполнительного органа и соотношения ее размеров.

Отношение

$$i = \frac{(N_1 + N_2)}{F_a} = 2 \frac{a}{b}, \quad (3.2.13)$$

назовем общим передаточным отношением кинематической цепи исполнительного органа; это отношение является постоянным для каждого типоразмера исполнительного органа тормоза.

По требуемому тормозному моменту необходимо найти расчетное усилие Q в тормозной установке

$$M_T = F_a \gamma i f \eta R_T. \quad (3.2.14)$$

где γ – число тормозных приводов; R_T – радиус тормозного обода, м;

f - коэффициент трения тормозных колодок об обод, принимается для отечественной пресс-массы равным 0,3; η - КПД рычажной системы тормоза, КПД = 0,95; i - передаточное число рычажного механизма тормоза.

Для обеспечения регулирования движения рычага торможения подъемной установки определены силовые соотношения в винтовой гайки передачи: для удобства рассмотрения сил в винтовой паре развернем виток резьбы по среднему диаметру d_2 в наклонную плоскость, а гайку представим в виде ползуна (рис. 3.2.1) [77].

На рис. 3.2.1: R - равнодействующая сил N и F_f , угол φ между векторами сил R и N - угол трения. Зависимость между F_a и F_t найдем из уравнения равновесия гайки под действием сил F_b , F_a , R

$$\vec{F}_t + \vec{F}_a + \vec{R} = 0 \quad (3.2.15)$$

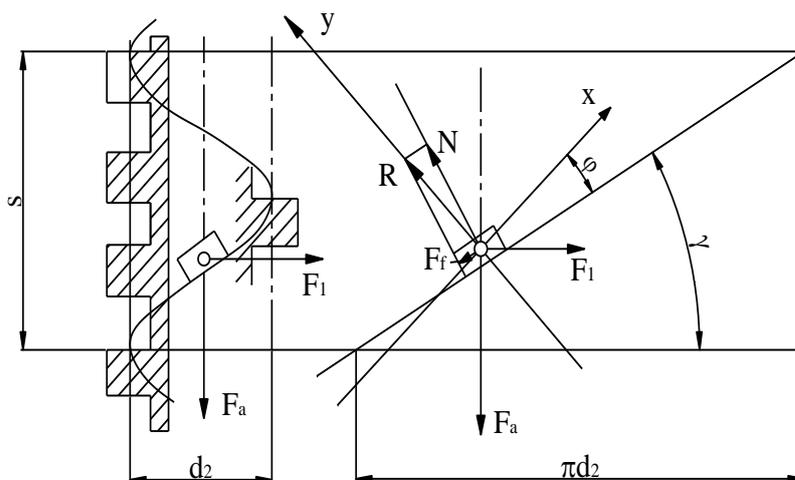


Рис 3.2.1 Расчетная схема для определения силовых соотношений в винтовой передаче (Б-Б)

Проецируем эти силы на оси x-y

$$F_t \cos(\gamma + \varphi) - F_a \sin(\gamma + \varphi) = 0, \quad (3.2.16)$$

Откуда получим соотношение модулей сил

$$F_t = F_a \tan(\gamma + \varphi), \quad (3.2.17)$$

Формула справедлива только для прямоугольной резьбы. Для треугольной или трапецидальной резьбы

$$F_t = F_a \tan(\gamma + \varphi'), \quad (3.2.18)$$

где $\varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{f}{\cos(\alpha/2)}\right)$ - приведенный угол трения; α - угол профиля резьбы

Резбовой момент

$$M_r = F_t \frac{d_2}{2} = F_a \tan(\gamma + \varphi') \frac{d_2}{2}, \quad (3.2.19)$$

И момент трения

$$M_g = F_{ms} r_{tb} = f F_a \frac{d_n + d_0}{4}, \quad (3.2.20)$$

где d_n, d_0 - наружный и внутренний диаметр.

Таким образом, требуется добавлять вращательный момент для балансирования с моментом резьбы:

$$M_r = F_a(0,5d_2 \tan(\gamma + \varphi') + 0,25f(d_n + d_0)). \quad (3.2.21)$$

В качестве примера приведен способ выбора параметра винтовой передаче: $d_2 = 90\text{мм}$; $d_n = 85\text{мм}$; $d_0 = 92\text{мм}$; $\gamma = 12^\circ$; $\varphi' = 6^\circ$; $f = 0,105$.

И мощность двигателя тормозного установки можно рассчитать по формуле:

$$P_H = \frac{M_r \cdot n}{9549} \text{ кВт} \quad (3.2.22)$$

где n – обороты коленчатого вала двигателя (об./мин.)

Коэффициент перегрузки:

$$\lambda_H = \frac{M_{кр}}{M_r} \quad (3.2.23)$$

где $M_{кр}$ – критический момент двигателя;

Таким образом, по выражения (3.2.12-3.2.14), (3.2.21), (3.2.22) мы получили формулу связи между мощностью реактивно-вентильного электродвигателя тормозной установки и усилия нажатия колодок:

$$P_H = \frac{F_a(0,5d_2 \tan(\gamma + \varphi') + 0,25f(d_n + d_0)) \cdot n}{9549} \quad (3.2.24)$$

Или

$$P_H = \frac{0,5 \cdot b \cdot (N_1 + N_2) (0,5d_2 \tan(\gamma + \varphi') + 0,25f(d_n + d_0)) \cdot n}{38196 \cdot \gamma a f \eta R_T^2} \quad (3.2.25)$$

Выбор реактивно-вентильного электродвигателя тормозной установки производится по номинальной мощности двигателя, которая должна быть больше P_H .

Для электрического торможения движимого объекта двигатель переводится в генераторный режим, при котором создается тормозной момент. Наиболее интересным является рекуперативное торможение при котором происходит генерирование электрической энергии. Рекуперативное торможение с энергетической точки зрения является наиболее выгодным. Преимуществом электрического торможения является значительно меньшая склонность к износу подвижным механизмом и колодок тормозной. В режим рекуперативного торможения можно перевести только электродвигатели с независимым, параллельным и смешанным возбуждением. При уменьшении нагрузочного момента, частота вращения ротора возрастает, при этом увеличивается индуцированная в нем ЭДС, уменьшается ток и создаваемый двигателем электромагнитный момент. Если пренебречь трением и внутренними потерями, то при холостом ходе ЭДС электродвигателя становится равной напряжению сети, а ток и развиваемый двигателем электромагнитный момент оказывается равным нулю. При этом электромагнитный момент направлен против вращения ротора, а выработанная генератором электрическая энергия отдается в сеть [78].

Применять рекуперативное торможение для полной остановки нельзя. Для генерирования двигателем, работающего в генераторном режиме, необходимой электрической энергии потребовало бы при низких частотах вращения значительного увеличения магнитного потока и тока, отдаваемого возбудителем. Поэтому рекуперативное торможение может применяться только до определенной минимальной частоты вращения.

3.3. Моделирование переходных процессов в системе исполнительный механизм – реактивно-вентильный электродвигатель – устройство рекуперации электрической энергии

Общая схема имитационной модели трехфазной реактивно-вентильного электродвигателя с вентильным коммутатором показана на рис. 3.3.1. Основные допущения, принятые при составлении имитационной модели: активные сопротивления фаз, не зависящие от температуры обмотки статора; силовые транзисторы и диоды представлены функциональными резисторами; без учета взаимоиндукция фазных обмоток двигателя; без учета индуктивности рассеяния [22].

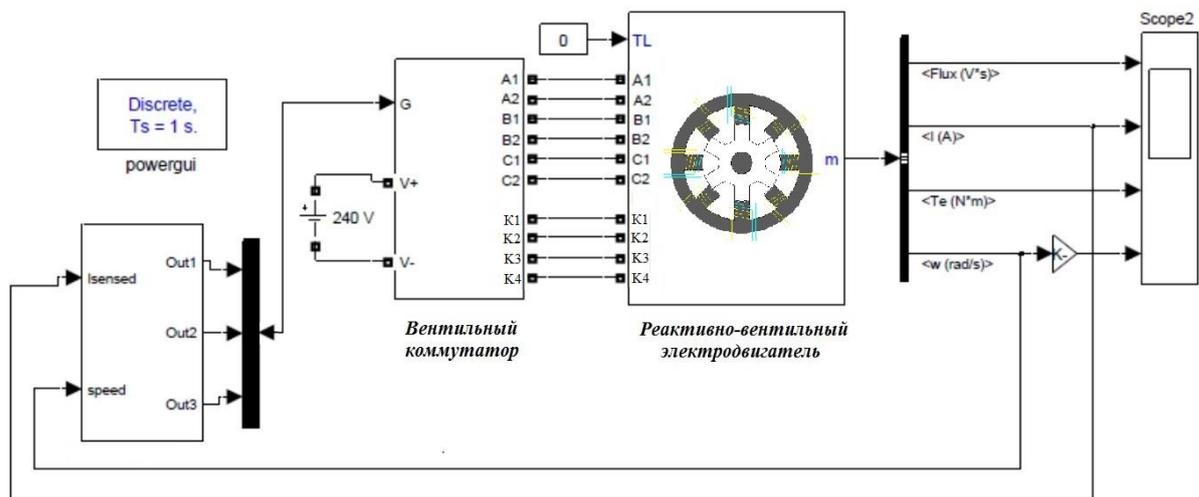


Рис. 3.3.1 Общая схема реактивно-вентильного электродвигателя, с обмотками контроля [23-24]

В общую схему входят реактивно-вентильный электродвигатель, состоящий из безобмоточного ротора, статора, имеющего полюса с обмотками, дополнительно на которые намотаны обмотки контроля, расположенные с определенным шагом, обеспечивающие определение положение ротора вследствие изменения магнитного поля [23], вентильный коммутатор, блок определения угла поворота ротора, угол включения

напряжения, угол отключения напряжения, осциллограмма, заданное устройство нагрузки, источник питания двигателя и коммутатора. Напряжение питания реактивно-вентильно электродвигателя подается от блок DC VoltageSource, который формирует источник постоянного тока.

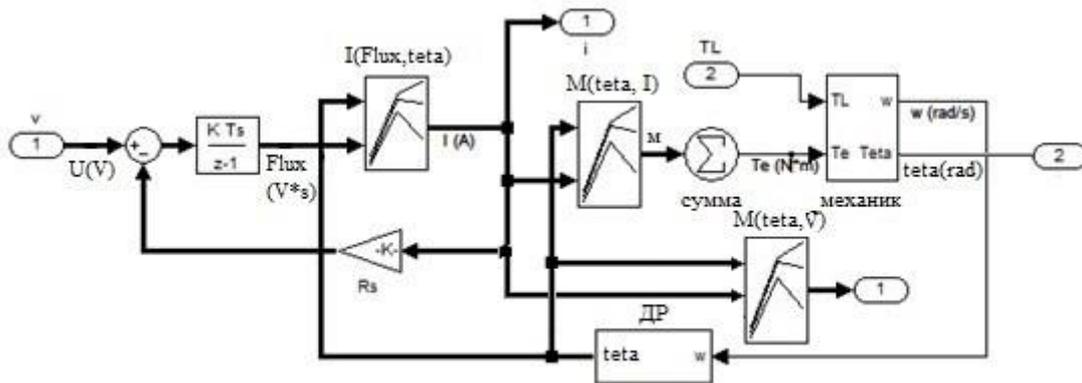


Рис. 3.3.2. Структурная схема имитационной математической модели

На рис. 3.3.2. показана структурная схема имитационной математической модели для каждого фазы. В эту схему входят блок Flux, блок тока, блок момента, блок механики. Блоком тока являются аппроксимационная таблица зависимости тока от угла ротора и потокосцепления. Блоком момента являются аппроксимационная таблица зависимости момента от угла ротора и тока обмотки.

Потокосцепления реактивно-вентильного электродвигателя может выражаться в виде функции тока статора и ротора [71-72]

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi(i, \theta) = L_q i + [L_{dsat} i + A(1 - e^{-Bi}) - L_q i] \cdot f(\theta); \\ A = \Psi_m - L_{dat} I_m; \\ B = \frac{L_d - L_{dsat}}{\Psi_m - L_{dat} I_m}, \end{array} \right. \quad (3.3.1)$$

где L_q - минимальная индуктивность; L_{dsat} - насыщенная индуктивность;

L_d - ненасыщенная индуктивность; N_r - число полюсов ротора.

Зависимость момента двигателя от угла поворота, тока и индуктивности вычитается выражением (3.1.5) и определяется выражением [21]

$$M_e(i, \theta) = \left[\frac{(L_{dsat} - L_q) \cdot i^2}{2} + Ai - \frac{A(1 - e^{-Bi})}{B} \right] \cdot f'(\theta) \quad (3.3.2)$$

$$f'(\theta) = 6 \frac{N_r^3}{\pi^3} \theta^2 - 6 \frac{N_r^2}{\pi^2} \theta$$

Механическая динамика двигателя и нагрузка определяются уравнениями движения (3.1.6), структура показана на рис. 3.3.3

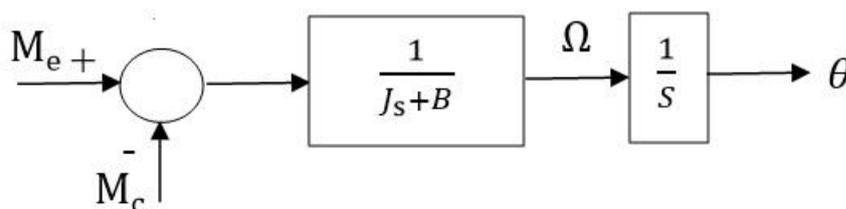


Рис. 3.3.3 Моделирование механических характеристик двигателя и нагрузки.

На рисунке 3.3.4 показана структурная схема вентильного коммутатора для трехфазных реактивно-вентильных электродвигателей с обмотками контроля, в которой работают 10 транзисторов и 10 диодов от источника питания и управляющих сигналов от блока датчика положения.

Совместное математическое описание механической и приводной частей позволяет получить окончательный вариант математического описания трехмассовой электро-механической системы многодвигательного подъемно-транспортного механизма с реактивно – вентильным электродвигателем:

$$M - (M_{21} - M_{13}) = J_1 p \omega_1 \quad (3.3.3)$$

$$M_{21} - M_{c2} = J_2 p \omega_2$$

$$-M_{13} - M_{c3} = J_3 p \omega_3$$

$$pM_{21} = C_{21}(\omega_1 - \omega_2)$$

$$pM_{13} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1)$$

$$U_j = R \cdot i_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt}$$

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{\text{нГ}}$$

$$M_c = M_{\text{нГ}} + M_T,$$

где M_c - момент сопротивления, $M_{\text{нГ}}$ - момент нагрузки, M_T - момент торможения.

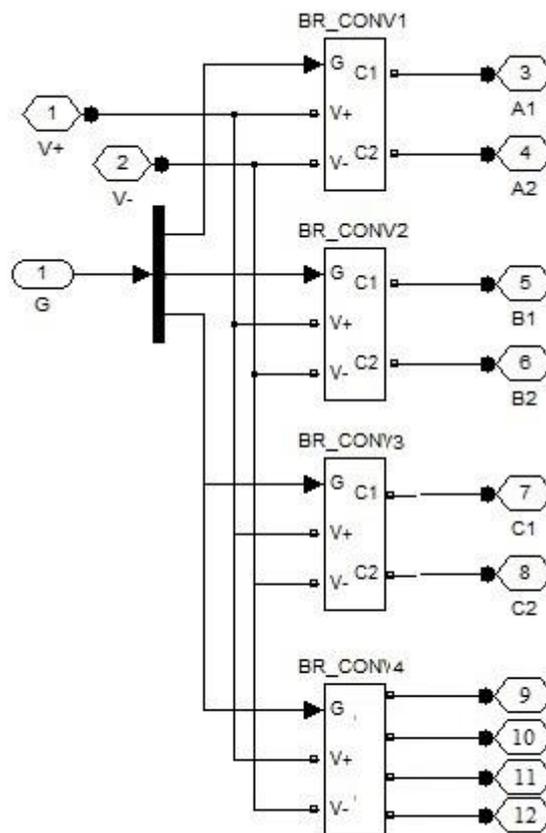


Рис. 3.3.4 Структурная схема вентиляционного коммутатора

Систему уравнений (3.3.3) можно представить в виде структурной схемы, с учетом момента торможения (рис. 3.3.5).

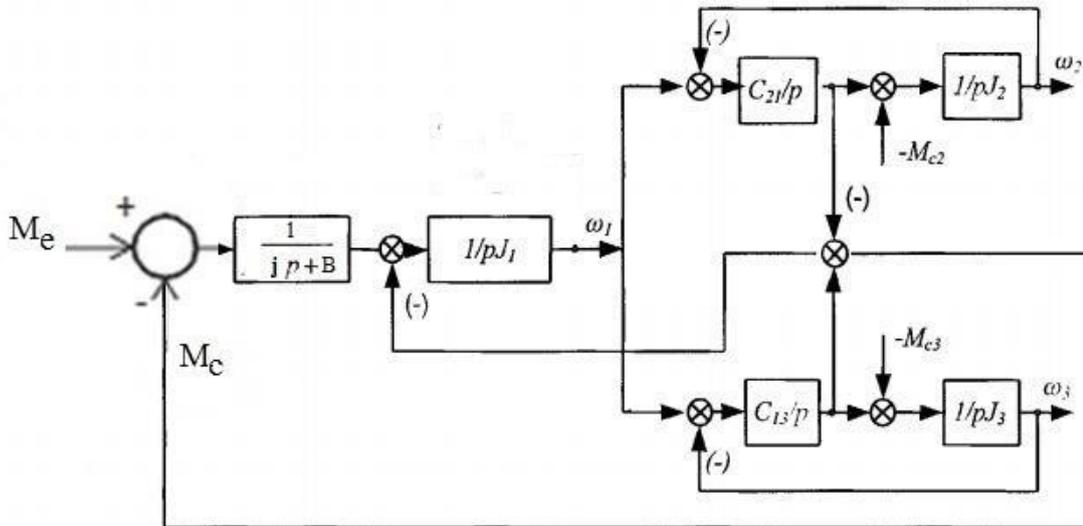


Рис. 3.3.5 Структурная схема электромеханической системы многодвигательного подъемно-транспортного механизма с реактивно-вентильным электродвигателем

Для бездатчикового определения углового положения ротора реактивно-вентильного электродвигателя, необходимо с дополнительно намотанных катушках снимать измерительные значения. С этой целью рассмотрена модель коммутатора (рис. 3.3.6), которая позволяет измерять ЭДС, наводимую потоками фазных катушек в измерительных катушках [25].

На рис. 3.3.7 представлен алгоритм математической модели для расчета статических и динамических характеристик реактивно-вентильного электродвигателя.

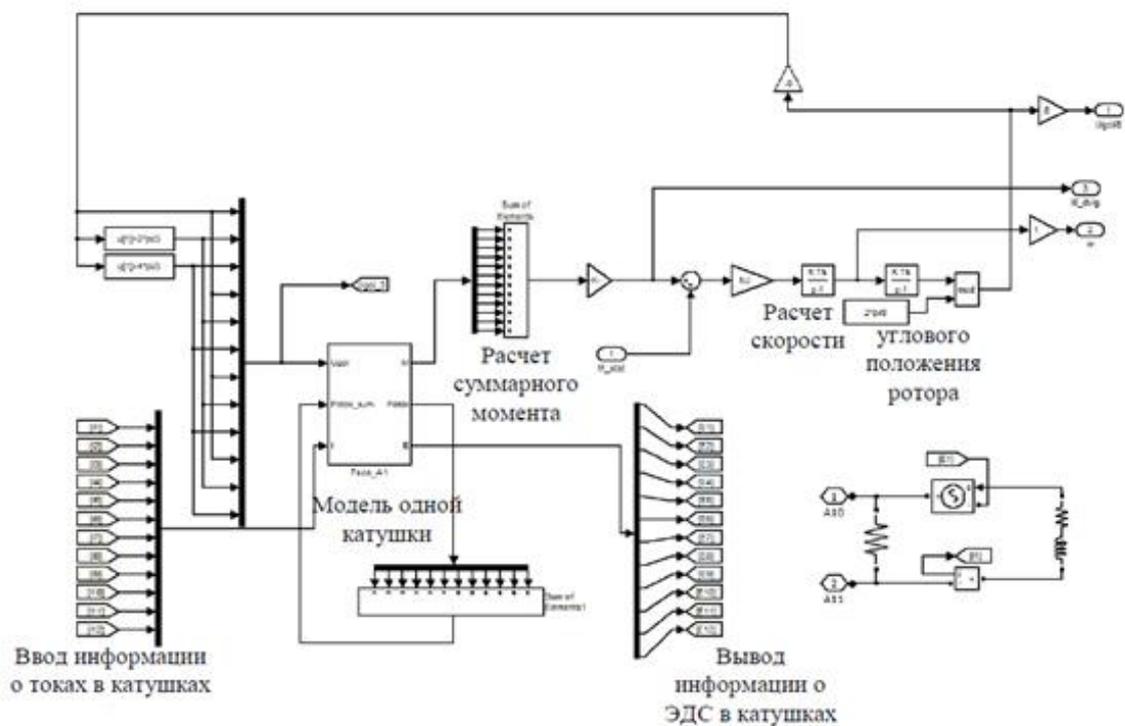
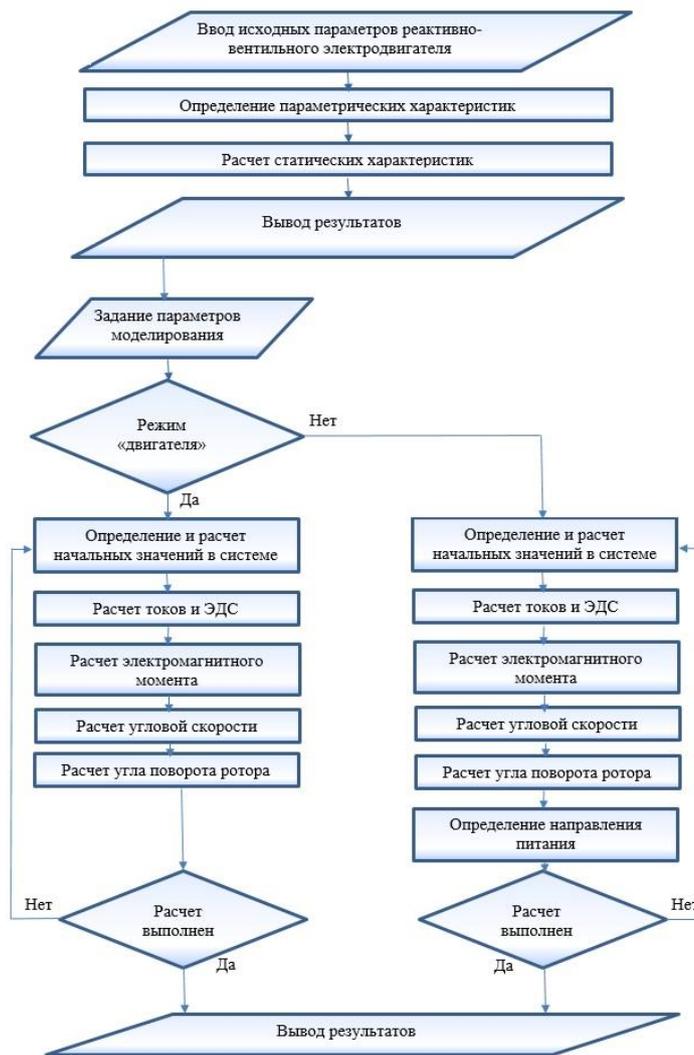


Рис. 3.3.6. Схема модели коммутатора

В соответствии с алгоритмом при моделировании выполняется расчет параметров реактивно-вентильного электродвигателя, задаются параметры моделирования, на первом этапе определяется режим работы и проводится 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 определяются электромагнитный момент, угловая скорость, угол поворота ротора. Первый и второй этапы повторяется многократно до достижения определенного условия, которое задается временным интервалом.



3.3.7 Алгоритм математической модели реактивно-вентильного электродвигателя

В соответствии с алгоритмом при моделировании выполняется расчет параметров реактивно-вентильного электродвигателя, задаются параметры моделирования, на первом этапе определяется режим работы и проводится 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 определяются 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.

Результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя показаны на рис. 3.3.8-3.3.9.

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.

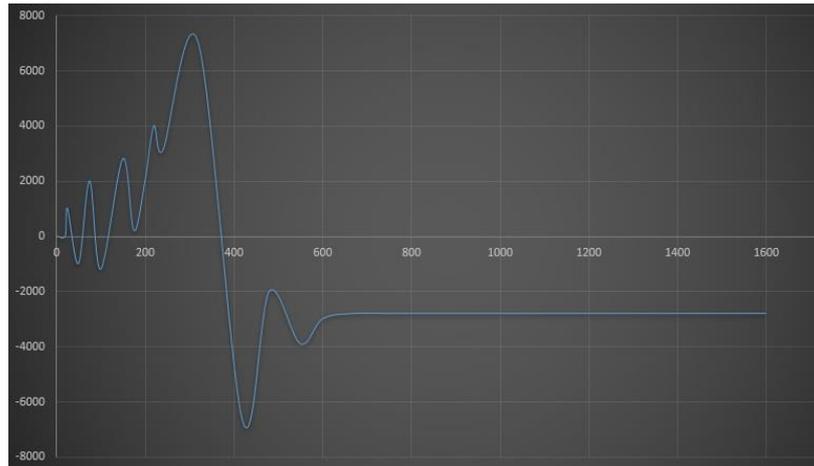


Рис. 3.3.8. Потребление мощности двигателя, работающего в генераторном режиме

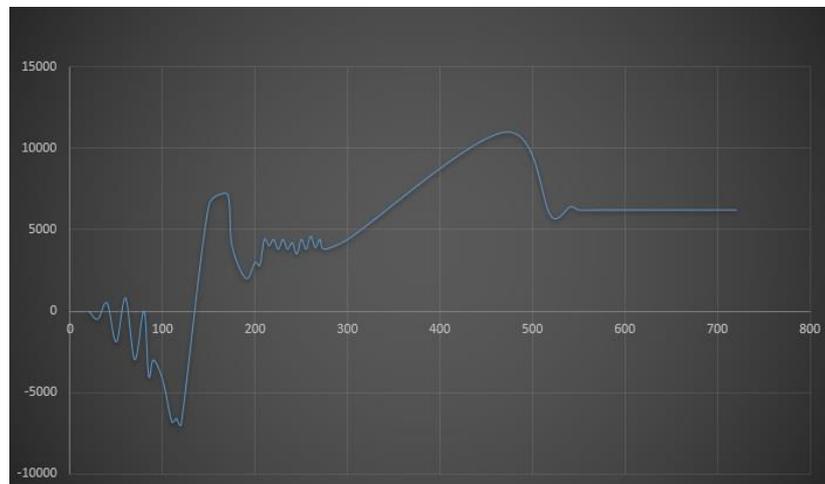


Рис. 3.3.9. Вырабатываемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме

3.4. Разработка параметрического ряда и исследование устойчивости системы рекуперации

Соотнесем определение параметрического ряда оборудования систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов используем формулу с обобщенным показателем

энергетической эффективности электропривода χ [20,26,96], рассмотренного в первой главе

Для определения параметрического ряда оборудования систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями используем формулу с обобщенным показателем энергетической эффективности электропривода χ [26],

$$\chi = \frac{A_{p.o.u\Sigma}}{A_{p.o.u\Sigma} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{\Sigma i} \Delta t_i}, \quad (3.4.1)$$

Следовательно, формулу для суммарной технологически полезной работы за время цикла многодвигательного электропривода подъемно-транспортного оборудования для генераторного режима работы электрических двигателей при рекуперативном торможении, запишем в следующем виде:

Полезная работа за цикл работы в режиме генератора реактивно-вентильного электродвигателя в многодвигательном подъемно-транспортном механизме имеет следующий вид:

$$A_{p.o.u\Sigma} = \sum_{i=1}^n |N_{дв} \cdot P_{p.o.i}| \Delta t_i + m \cdot \frac{G_{гр} \cdot V_{гр}^2}{2}, \quad (3.4.2)$$

где $N_{дв}$ - количество двигателей, работающих в генераторном режиме;

$G_{гр}$ – масса груза, $V_{гр}$ - скорость движения груза.

Средний ток электронного ключа рассчитывается следующим образом [20]

$$I_{кэ(ср)} = P_{вх} / U_{сс} \quad (3.4.3)$$

где U_{cc} – выпрямленное сетевое напряжение; $P_{вх}$ – максимальная входная мощность.

Параметрический ряд оборудования системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмов учитывающий следующие значения параметров

Суммарное время цикла: $t_{ц} = 1092$ (с);

Число пусков и торможений в цикле: $m=4$;

Масса груза: $G_{гр} = 5000$ кг;

Скорость движения груза: $V_{гр} = 0,5$ м/с;

Количество двигателей, работающих в генераторном режиме: $N_{ген} = 3$ и 4.

Согласно математической модели системы рекуперации электроэнергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, определен параметрический ряд оборудования систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, приведенный в таблице 3.4.1, с учетом формул энергетической эффективности (3.4.1), (3.4.2), (3.4.3)

Таблица 3.4.1

$P_{ген},$ кВт	$N_{ген}$	χ	$I_{тп},$ А	$N_{ген}$	χ	$I_{тп},$ 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 двух способов решений уравнений движений, где прямое решение методом Рунге-Кутта [86-88] и структурное моделирование в пакете Matlab [89-90] определяются зависимости между входными параметрами и выходными, а также оценочными показателями эффективности функционирования устанавливаются моделированием переходных процессов в системе рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов.

Решение методом Рунге-Кутта – конечно-разностная аппроксимирующая производных, используемая для определения рациональных параметров новых технических решений для повышения эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, устанавливая порядком их точности, которая прямо пропорционально числу ее элементов. В случае большего числа элементов соотношение становится более громоздким. Поэтому достаточно эффективным способом уточнения решения при фиксированном числе элементов системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, при использовании аппроксимирующих конечно-разностных

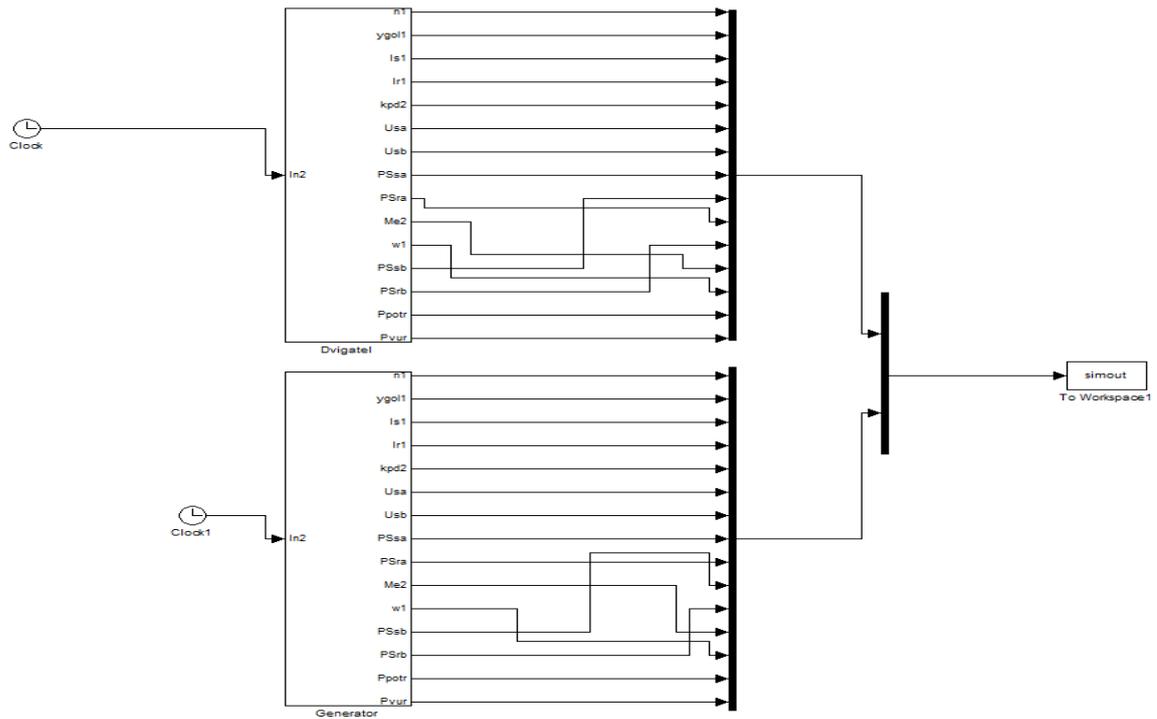
соотношений, является метод Рунге-Ромберга из которого получена формула Рунге,

$$F(x) = f(x, h) + \frac{f(x, h) - f(x, kh)}{k^{p-1}} + \Delta^m O(k^{p+1}) \quad (3.4.4)$$

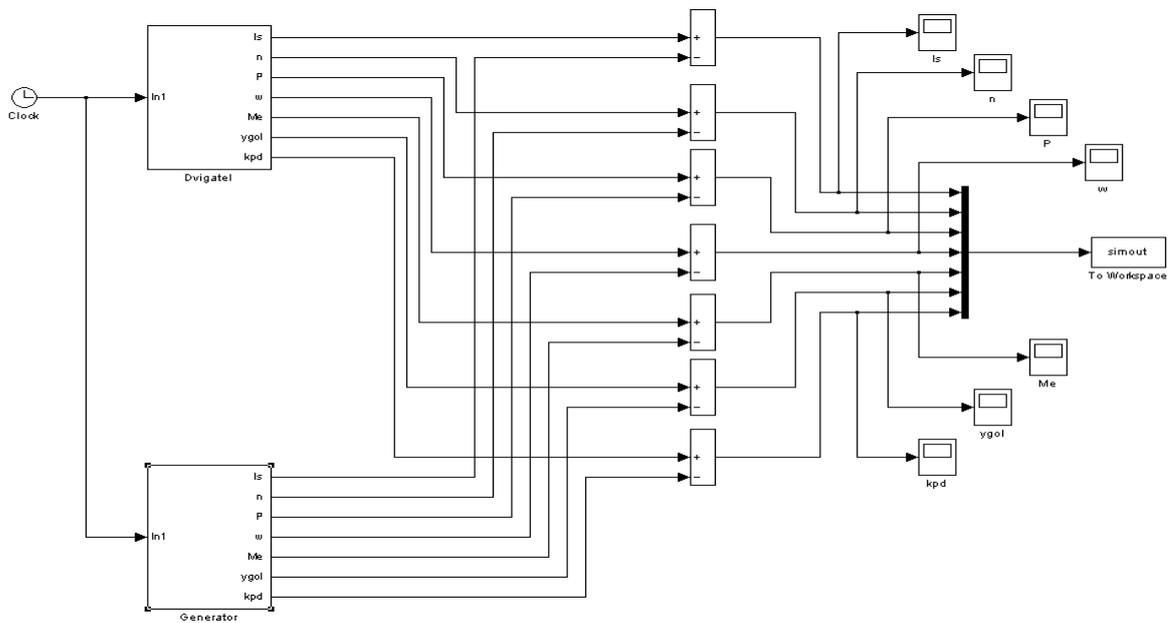
позволяющая по результатам двух расчетов значений производной $f(x, h)$ и $f(x, kh)$ (шаг h и kh) с порядком точности p рассчитать рациональные параметры системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов, где $f(x, h)$ – конечно-разностная аппроксимация уравнений движения – производной с шагом h ; k – коэффициент, и, с порядком точности их значения с точностью $p+1$.

$O(k^{p+1})$ – разности нуля, являющиеся конечными разностями при x^k , $x=0$, $m \leq h$.

Исходными данными для проектирования динамической системы являются структурные схемы. На основе структурных схем, разработана имитационная модель, 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.



a)



б)

Рис.3.4.1. Имитационная модель для а) зависимой и б) независимой электромеханической систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов

Происходящие переходные процессы моделируются на основе параметров для математического описания, представленных в табл.3.4.2.

Таблица 3.4.2. Параметры имитационной модели

п/п	Входные параметры двигательного режима	Обозначение
1.	Номинальная мощность, кВт	P_n
2.	Напряжение, В	U_1
3.	Коэффициент полезного действия	k_{pd}
4.	Число пар полюсов	PP
5.	Номинальное скольжение	S_n
6.	Коэффициент отношения максимального к номинальному моменту	K_i
7.	Коэффициент отношения минимального к номинальному моменту	K_m
8.	Коэффициент отношения начального пускового к номинальному моменту	K_p
9.	Косинус φ	$\cos \varphi_i$
10.	Момент инерции, кг · м ²	J
11.	Момент сопротивления	M_c
	Выходные параметры генераторного режима	
1.	Мощность потребления	$P_{потр}$
2.	Вырабатываемая мощность	$P_{выр}$
3.	Коэффициент полезного действия	KPD

4.	Энергетическая эффективность применения рекуперации электроэнергии	χ
----	--	---

Имитационная модель, составленная с помощью программного комплекса, позволяет изучить переходные процессы, касающиеся как двигательного, так и генераторного режимов работы систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов.

В результате исследования математической модели и получены результаты моделирования в программе Matlab в пакете Simulink на рис. 3.4.2.

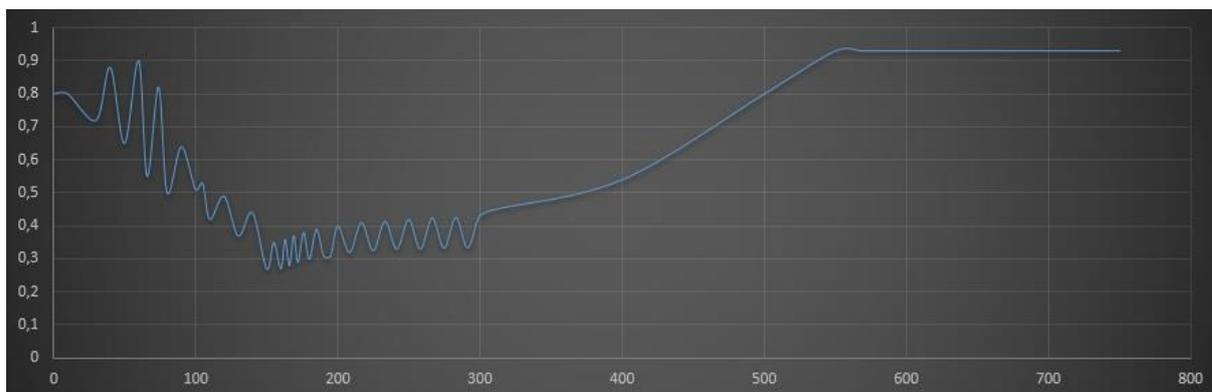


Рис.3.4.2. Работа системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов

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

3.5. Выводы

1. Разработана математическая модель многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, учитывающая функциональные связи тормозного устройства и режима генерации электрической энергии.

2. Установлены зависимости для расчёта характеристик реактивно-вентильных электродвигателей подъемно-транспортных механизмов на основе которых разработана методика их выбора.

3. 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.

4. Определены параметрический ряд, и, рациональные режимные и конструктивные параметры.

4. Разработана математическая модель системы рекуперации электрической энергии для электромеханических систем с независимым исполнением кинематики многодвигательных подъемно-транспортных механизмов.

5. 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.

6. 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.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМАХ

4.1. Планирование эксперимента

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) K_n [92, 93].

В связи с возросшей сложностью и стоимостью заданных им свойств основано на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путем использования функциональной избыточности [82].

Работоспособность системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах характеризуется параметром x , и предельным значением x^* . Получаем функцию распределения определяющего параметра $F(x)$ и условие работоспособности $x < x^*$. Оценка вероятности эффективности функционирования имеет вид

$$\hat{P} \cong F(\hat{h}), \quad (4.1.1)$$

где \hat{h} - квантиль нормированного распределения.

Нижнее значение вероятности эффективности работы

$$P = F(\underline{h}), \quad (4.1.2)$$

где \underline{h} - нижнее значение квантили, соответствующее заданной доверительной вероятности $\hat{\gamma}$.

При нормальном законе распределения параметра x определяется минимальное число испытаний. Если значения x распределены не по нормальному закону, то можно от параметра x перейти к параметру z , значения которого распределены по нормальному закону. В общем случае нижняя граница для квантили нормального определения

$$\underline{h} = \underline{b}(n, \hat{\gamma}, \hat{h})n^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.1.3)$$

где $\underline{b}(n, \hat{\gamma}, \hat{h})$ - нижняя доверительная граница для параметра δ нецентрального распределения Стьюдента; n - число испытаний; $\hat{\gamma}$ - уровень доверительной вероятности.

Для приближённых расчётов более удобно пользоваться равенством

$$\underline{h} \cong \hat{h} - u_{\gamma}n^{-\frac{1}{2}}\left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.1.4)$$

где u_{γ} - квантиль нормального распределения, соответствующая уровню доверительной вероятности $\hat{\gamma}$, откуда

$$n \cong \frac{u_{\gamma}^2}{(\hat{h} - \underline{h})^2} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2}\right). \quad (4.1.5)$$

Зависимость (4.1.5) позволяет установить требуемую вероятность эффективности работы системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями при наименьшем числе испытаний.

При наличии условия работоспособности

$$z - x > 0, \quad (4.1.6)$$

где z – обобщённая функциональная надёжность; x – обобщённая эффективность функционирования,

$$\hat{h} = \frac{K_H - 1}{(v_1^2 K_H^2 + v_2^2 - 2rv_1 v_2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.1.7)$$

r – коэффициент корреляции между функциональной надёжностью и обобщённой эффективностью функционирования; v_1, v_2 – соответственно коэффициенты вариации функциональной надёжности и обобщённой функциональной эффективности функционирования.

Подставляя в зависимость (4.1.5) выражение (4.1.7), имеем

$$n = \frac{u_{\gamma}^2 (\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2 - 2\hat{r} \hat{K}_H \hat{v}_1 \hat{v}_2) \left[1 + \frac{(\hat{K}_H - 1)^2}{2(\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2 - 2\hat{r} \hat{K}_H \hat{v}_1 \hat{v}_2)} \right]}{\left[\hat{K}_H - 1 - \underline{h} (\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2 - 2\hat{r} \hat{K}_H \hat{v}_1 \hat{v}_2)^{\frac{1}{2}} \right]^2}. \quad (4.1.8)$$

При $r=0$ зависимость (4.1.8) примет вид

$$n = \frac{u_{\gamma}^2 (\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2) \left[1 + \frac{(\hat{K}_H - 1)^2}{2(\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2)} \right]}{\left[\hat{K}_H - 1 - \underline{h} (\hat{v}_1^2 \hat{K}_H^2 + \hat{v}_2^2)^{\frac{1}{2}} \right]^2}. \quad (4.1.9)$$

Из зависимостей (4.1.5), (4.1.8), (4.1.9) следует, что при большом числе испытаний подтвердить высокие значения вероятности эффективности работы системы рекуперации электрической энергии

многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями можно только при больших значениях коэффициента K_n (рис.4.1.1)

Уменьшить число испытаний возможно за счёт увеличения K_n , однако не всегда возможно и целесообразно уменьшить число испытаний, необходимых для подтверждения требуемого уровня эффективности функционирования за счёт увеличения K_n .

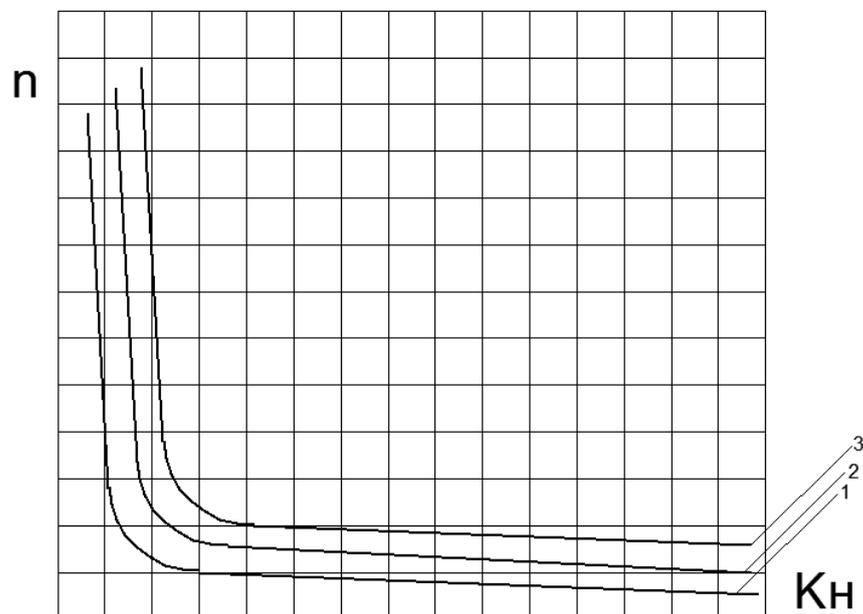


Рис. 4.1.1. Графики зависимости $n=f(K_n)$ для $U=1,28, v_1 = v_2 = 0,1$

В общем случае должны учитываться затраты как на увеличение K_n , так и на увеличение n . Анализ полученных зависимостей при $v_1=v_2=v$ и $r=0$, где

$$n = \frac{K_H - 1}{v(1 + K_H^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.1.10)$$

$\hat{h} = h$, следовательно можно найти минимальное значение коэффициента K_H , при котором подтверждается требуемый уровень эффективности функционирования. Получено уравнение

$$K_H(1 - \underline{h}^2 v^2) - 2r - \underline{h}^2 v^2 + 1 = 0, \quad (4.1.11)$$

откуда

$$K_H = (1 + \underline{h}v)^{-1}. \quad (4.1.12)$$

Представим зависимость (4.1.12) в виде

$$K_H = (1 - x)^{-1}, \quad (4.1.13)$$

где $x = \underline{h}v$ (рис. 4.1.2), т.е., зная x , определим минимальное значение K_H , при котором подтверждается требуемый уровень эффективности функционирования при $n \rightarrow \infty$.

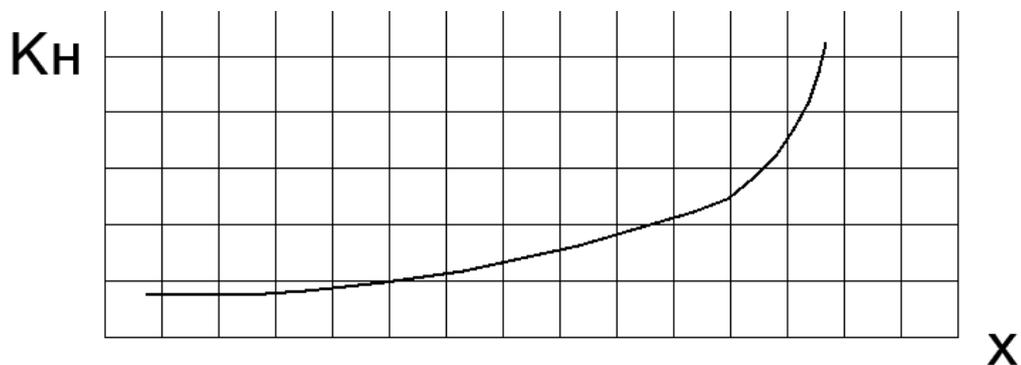


Рис. 4.1.2. График зависимости $K_H = f(x)$ при $x = \underline{h}v$

Исходя из физического смысла K_n значения x могут находиться в интервале

$[0, 1]$. Поэтому для каждого ν существует такое предельное h^* , которое невозможно превзойти ни при каких значениях K_n , т.к. для каждого ν существует такое предельное значение вероятности эффективности функционирования P^* , которое нельзя подтвердить ни при каких значениях K_n

$$h^* = \nu^{-1}. \quad (4.1.14)$$

Значение h^* является максимальным для h , получаемым при $K_n \rightarrow \infty$. Подставляя значения h в зависимость (4.1.5) вместо \hat{h} ($\nu_1 = \nu_2 = \nu$, $r = 0$), получим минимальное n , при котором подтверждается требуемый уровень эффективности функционирования

$$n = \frac{u_{\gamma}^2(1+2\nu^2)}{2(1-\underline{h}\nu)^2}, \quad (4.1.15)$$

где при $\underline{h}\nu \rightarrow 1$ число испытаний $n \rightarrow \infty$ (рис.4.1.3).

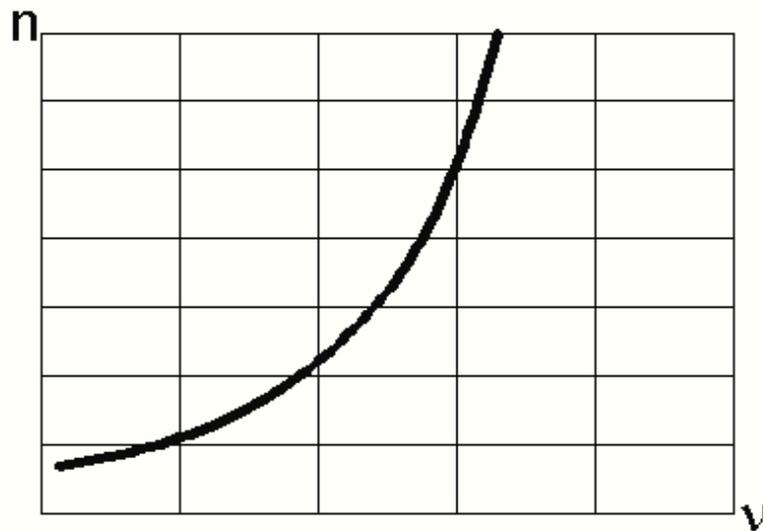


Рис. 4.1.3. График зависимости $n=f(v)$ при $h=2,3$ и $u_\gamma = 1,28$

Кроме того,

$$n = \frac{1+3(1-P_H)^2}{(1-P_H)^2}. \quad (4.1.16)$$

Требуемая вероятность эффективности функционирования получения результатов экспериментальных исследований по функциональной надежности

$$\hat{P}_H = 1 - \frac{1,42\{1-hv^2\}}{\left[u_\gamma^2(1+2v^2)-6(1-hv^2)^2\right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (4.1.17)$$

где \hat{P}_H – минимальная вероятность, соответствующая требуемому уровню получения результатов испытаний.

По зависимостям (4.1.1) – (4.1.17) и исходным данным (рис.4.1.1) определён диапазон изменения $P_n = 0,9 \dots 0,95$, которому соответствует минимальное число испытаний $n = 26 \dots 38$, и при непрерывной записи процесса интервал между точками отсчёта выбирается из условия $P_n=0,9$; достаточности объёма $n = 108$.

Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в лабораторных условиях. Проводимые испытания основаны на теории подобия физических процессов и составления критериев подобия, обеспечивающих получение требуемого уровня эффективности функционирования на основе обоснования необходимого объёма экспериментальных исследований [94].

Определим критерии путем приведения уравнений математической модели системы рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов [94] к безразмерному виду способом интегральных аналогов [95,87].

$$\pi_1 = \frac{i_{sa} \cdot R_s}{u_{sa}}; \pi_2 = \frac{\psi_{sa}}{t \cdot u_{sa}}; \pi_3 = \frac{i_{s\beta} \cdot R_s}{u_{s\beta}};$$

$$\pi_4 = \frac{\psi_{s\beta}}{t \cdot u_{s\beta}};$$

$$\pi_5 = \frac{(-M_c)}{M}; \pi_6 = \frac{J \cdot \omega}{t \cdot M},$$

$$\pi_7 = \frac{K_{HC}}{K_{HH}}$$

где $i_{sa}, i_{s\beta}$ – составляющие тока статора двигателей, работающих в генераторном режиме; $u_{sa}, u_{s\beta}$ – составляющие напряжения статора

двигателей, работающих в генераторном режиме; $\psi_{sa}, \psi_{s\beta}$ – составляющие потокосцепления статора двигателей, работающих в генераторном режиме; $\psi_{ra}, \psi_{r\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора двигателей, работающих в генераторном режиме; R_s – сопротивления в обмотках статора двигателей, работающих в генераторном режиме; $\psi_{ra}, \psi_{r\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора двигателей, работающих в генераторном режиме; t – составляющая критерия подобия; M – момент на валу генератора; M_c – момент сопротивления, приводящий двигатель в генераторный режим; $K_{нс}, K_{нн}$ – коэффициент надежности существующего и нового технического уровня.

Полученные критерии дают возможность проследить динамику изменения критериев в зависимости от комбинации применяемых двигателей в генераторном режиме работы системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах и выбрать оптимальный, соответствующий максимальной эффективности и минимальным потерям электроэнергии. Данная динамика позволяет определить топологию применения системы рекуперации электроэнергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями. Определение наиболее оптимальных значений критериев для определенной области применения многодвигательных подъемно-транспортных механизмов с реактивно-вентильными электродвигателями, получая при этом зависимости параметров, характеризующие процесс работы, является задачей обоснования критериев.

4.2. Стенд, аппаратура и методика эксперимента

Разработанный стенд с аппаратурой экспериментальных исследований для электромеханической системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильным электродвигателем представлена на рисунке 4.2.1.

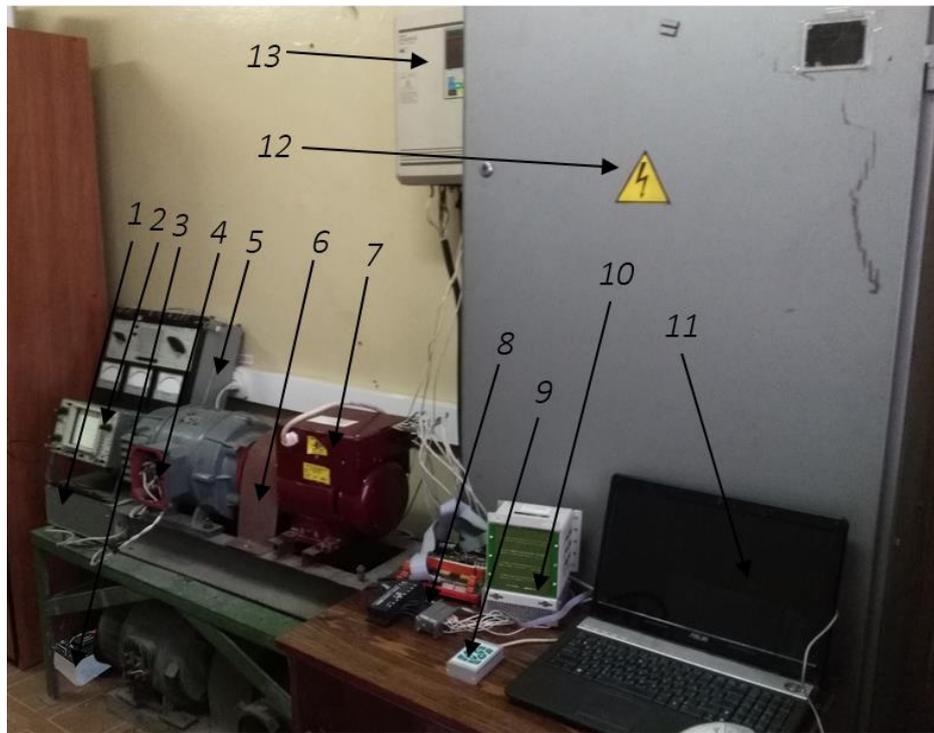


Рис. 4.2.1. Стенд и аппаратура экспериментальных исследований для электромеханической системы рекуперации электрической энергии с реактивно-вентильным электродвигателем

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, выполненном на базе микроконтроллера PIC12F629 [25];

2- осциллограф;

3- суперконденсатор системы рекуперации электрической энергии, тип МСК-8-112 ;

4- генератор, для моделирования генераторного режима реактивно-вентильного электродвигателя, тип П-31;

5- датчики тока и напряжения;

6- муфта с механическим тормозным устройством;

7- реактивно-вентильный электродвигатель, с блоком коммутации, тип КВРП-3-3;

8- блок драйверов для управления микропроцессорной системой управления, тип IR2106;

9- пульт управления генератором;

10- микропроцессорная система управления, на основе PIC18F4321;

11- ЭВМ для формирования управляющих воздействий и сбора данных Intel® Core™ 2 Duo CPU 2.93 GHz/4 GB RAM;

12- ВРУ с блоками питания тип ИПС-1200-220/110В, ИПС-200-220/12В и защитной автоматикой;

13- частотный преобразователь для регулирования скорости вращения генератора тип 3G3XV-AB015-CE SYSDRIVE Inverter.

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.

4.3. Экспериментальные исследования

Результаты экспериментальных исследований, обработанных ЭВМ показаны на рис. 4.3.1

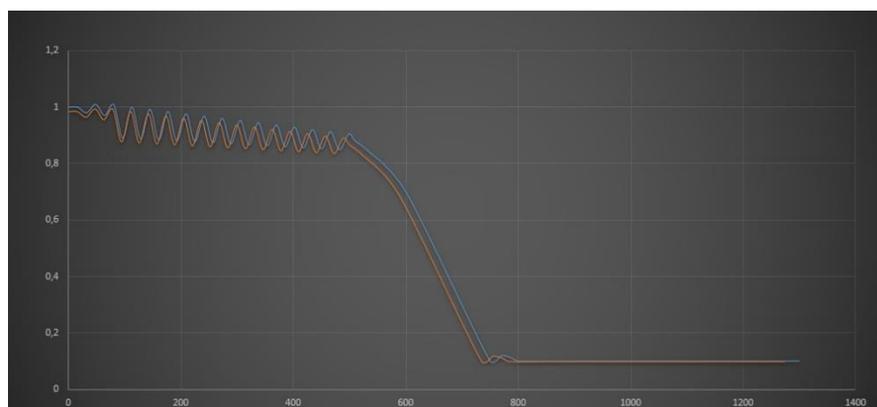


Рис.4.3.1. Результаты экспериментальных исследований независимых электромеханических систем рекуперации электрической энергии многодвигательных подъемно-транспортных механизмов

Результаты изменения мощности в сравнении с численным анализом, реактивно-вентильного электродвигателя, работающего в генераторном режиме представлены на рис. 4.3.2. и 4.3.2

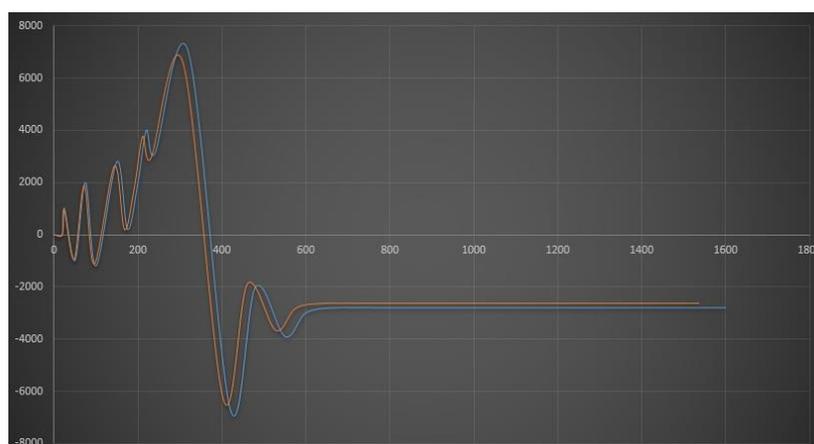


Рис. 4.3.2. Потребление мощности двигателя, работающего в генераторном режиме

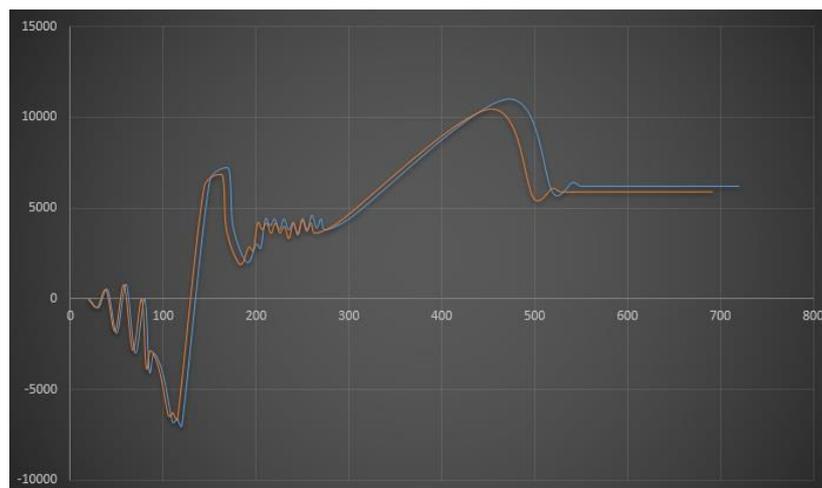


Рис. 4.3.3. Вырабатываемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме

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.

4.4. Выводы

1. Проведено планирование эксперимента, выбрана аппаратура для проведения экспериментальных исследований при применении технических решений по системе рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями. Определен объем экспериментальных

исследований, соответствующий минимальному числу и достаточному объему испытаний.

2. 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 подобий и оценке правильности разработанных технических решений.

3. Повышение эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах с реактивно-вентильными электродвигателями достигло 20 – 25%, согласно результатам теоретических и экспериментальных исследований, расхождение между ними составляет 14%. что допустимо в инженерных расчетов.

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 подобий 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов В.М, Кузьмина С.В. Устройство рекуперации электроэнергии: пат. 106236 Российская Федерация. 2011. 2 с;
2. Степанов В.М, Котеленко С.В. Устройство рекуперации электроэнергии: пат. 120823 Российская Федерация. 2012. 2 с;
3. Степанов В.М, Котеленко С.В. Устройство рекуперации электроэнергии: пат. 124089 Российская федерация. 2013. 4 с;
4. Степанов В.М, Котеленко С.В. Устройство рекуперации электроэнергии: пат. 145043 Российская Федерация. 2014. 2 с;
5. Степанов В.М, Кузьмина С.В. Устройство для рекуперации электроэнергии системы электроснабжения при многодвигательных промышленных установках и технологических комплексах. Молодые исследователи – регионам: материалы всероссийской научной конференции. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – Т.1. – 484 с. стр. 158-160;
6. Степанов В.М, Кузьмина С.В. Расчет режимных параметров регулируемого башенного крана. VI магистерская научно-техническая конференция: доклады статей, часть первая/ под научной редакцией д-ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 206с., стр. 183-184;
7. Степанов В.М, Котеленко С.В. Техническое решение рекуперации электроэнергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. VII региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / под общей ред. д-ра. техн. наук, проф. Е.А. Ядыкина: в 3 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. I. 248 с., стр. 154-156;

8. Степанов В.М, Котеленко С.В. Обоснование параметров зависимости величины значения рекуперированной электроэнергии в генераторном режиме в асинхронных двигателях от изменения параметров многодвигательной системы. VII региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / под общей ред. д-ра. техн. наук, проф. Е.А. Ядыкина: в 3 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. I. 248 с., стр.157-158;

9. Степанов В.М, Котеленко С.В. Применение устройств рекуперации электроэнергии. VII магистерская научно-техническая конференция: доклады статей, часть первая/ под научной редакцией д-ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 218с, стр. 179-180;

10. Степанов В.М, Котеленко С.В. Анализ устройств энергосбережения. VII магистерская научно-техническая конференция: доклады статей, часть первая/ под научной редакцией д-ра техн. наук, проф. Ядыкина Е.А. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 218с, стр. 178-179;

11. Степанов В.М, Котеленко С.В. Резервирование в системах рекуперации в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. Вестник энергоэффективности» №1 (01) ноябрь 2012;

12. Степанов В.М, Котеленко С.В. Анализ режима рекуперации в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. Информационно-аналитический журнал для профессионалов Региональная энергетика и энергосбережение 3/2012;

13. Степанов В.М, Кузьмина С.В. Система рекуперации многодвигательных подъемно-транспортных механизмов и машин.

Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. ч.4. 262 с., стр. 175 – 177;

14. Степанов В.М, Кузьмина С.В. Устройство рекуперации электроэнергии. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. ч.5. 107 с. стр. 79 – 80;

15. Котеленко С.В. Определение топологии структуры системы рекуперации с системой управления рекуперацией, управления дозированного питания электроэнергией и управления дозированного заряда/разряда накопительной установки. Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Вып. 12. Ч. 3. Тула: Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - 298с., стр.202-207 с.;

16. Котеленко С.В. Определение формирования закона управления рекуперацией электроэнергии, учитывающего в комплексе управление системой дозированного питания и системой дозированного заряда/разряда накопительной установки. Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Вып. 12. Ч. 3. Тула: Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. - 298с., стр.208-217 с.;

17. Степанов В.М, Котеленко С.В. Моделирование режима рекуперации в подъемно-транспортных механизмах. Вестник ИГЭУ. Вып. №1, Иваново, 2013 г. 116 с., стр. 108-110;

18. Степанов В.М, Котеленко С.В. Анализ технических решений по рекуперации электрической энергии. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.6: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. ч.1. 292 с., стр.152-158.

19. Степанов В.М, Котеленко С.В. Моделирование режима рекуперации в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.6: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. ч.1. 292 с., стр.158-165.;

20. Котеленко С.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Повышение эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах» г. Тула 2014.

21. Нгуен Чонг Хай Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Повышение эффективности функционирования электромеханических систем шахтных подъёмных установок с реактивно-вентильными электродвигателями» г. Тула 2016.

22. Туан Дисер Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Повышение эффективности функционирования электромеханических систем шахтных вентильно-реактивных установок с реактивно-вентильными электродвигателями» г. Тула 2016.

23. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №168624 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Опубл. 13.02.2016. Бюл. №5.

24. Степанов В.М., Горелов Ю.И., Авдошин В.С., Пахомов С.Н. Пат. №172453 на полезную модель. Вентильно-реактивный генератор: Рос. Федерация. Опубл. 11.07.2011. Бюл. №20.

25. Митрофаненков Юрий Николаевич Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Разработка бездатчикового управления вентильно-индукторной машины, г. Москва 2015

26. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001 – 704 с.

27. Ключев В.И., Терехов В.М. – Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для Вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с

28. Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики: конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с.

29. О. Гольдберг, Электромеханика: учебник для студ. высш. учеб. заведений /О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Г. Гольдберга - М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 512 с.

30. Белов М.П., Новиков А.Д. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов 3-е изд. - М.: Академия, 2007. - 576 с.

31. Слесарев М.М. «Рельсово-безрельсовое транспортное устройство с комбинированной энергоустановкой»: пат. 2332310 Российская Федерация 2008. 2 с.

32. Стуруа В.В., Чванов В.А., Сидоров В.И., Тарасов В.Н. «Способ перевозбуждения многодвигательного гистерезисного электропривода»: пат. 2081505. 1997. 2с.

33. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (моделирование и управление), КузГТУ, Кемерово, 2003.- 247 с.

34. Башарин С.А. – Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля. М.: Академия, 2010.

35. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. «Многодвигательный электропривод»: пат. 2332315. 2008. 2с.

36. Иванцов В.В. Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода ЭРАТОН-ФР
Статья. ЗАО ЭРАСИБ. 2012.12, 12 с.

37. Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода. Автореферат дис. доктора техн. наук. М., 1999.-38 с.
38. Голландцев Ю. А., Овчинников И. Е. Исследование вентильных двигателей: Учеб. пособие. Л.: ЛИАП, 1983.
39. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
40. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А., Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с.
41. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985.
42. Пахомин С.А. Развитие теории практика проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: автореф. Дис. Доктора тех. Наук. – Новочеркасск, 2001. – 40 с.
43. Смирнов Ю. В. Электромагнитный вентильно-индукторный двигатель // Электротехника. 2000. - № 3.
44. Ильинский Н. Ф. Перспективные применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях // Электротехника. -1997. №2.
45. Ильинский Н. Ф., Бычков М.Г. Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств // Электротехника. -2000. №2.
46. Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета магнитных полей и процессов электрических машин с дискретно распределенными обмотками. Автореф. дис. д-ра техн. наук/-М.: МЭИ- 1990;

47. Р. Дорф, Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылова. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2011. - 832 с.

48. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Название: Математическое моделирование электрических машин Издательство: М.: Высш. Школа Год: 1980

49. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 360 с.

50. Вольдек А.И. – Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. - 832 с.

51. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. – Математическое моделирование асинхронных машин. – М.: Энергия, 1969. - 97 с.

52. Новиков Е.А. Компьютерное моделирование жестких гибридных систем: монография / Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012.-451 с.

53. Гайсаров Р.В. Режимы работы синхронных генераторов и компенсаторов, Консп. Лекций Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005 г. – 42 с

54. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (моделирование и управление), КузГТУ, Кемерово, 2003.- 247 с.

55. Артемюк Б.Т. Асинхронные двигатели при периодической нагрузке. – Киев, Техника, 1972. – 200 с.

56. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. -Л.: Энергия, Ленингр. отдние, 1979.- 160с.

57. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. - 2-изд., перераб. и доп. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург, отд-ние, 1992 г. - 28 с.

58. Демьяненко Г.С., Бевз Е.Е. Неразрушающий контроль элементов тормозных и подвесных устройств. - Сб. науч. трудов МакНИИ. – Безопасная эксплуатация электромеханического электрооборудования на шахтах. - Макеевка-Донбасс, 1987, с.69-74.

59. Масандилов Л.Б., Москаленко В.В. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. М.: Энергия, 1968. - 72 с., с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 264).

60. Гальперин И.Я., Бежок В.С. Модернизация электропривода и автоматизация шахтных подъемных установок – М.: Недра, 1984. – 200 с.

61. Гришко А.П. Том 1. Рудничные подъемные установки: Учебник для вузов. - М.: Издательство МГГУ, 2006, - 477 с.

62. Белобров В. И. Тормозные системы шахтных подъемных машин / В. И. Белобров, В. Ф. Абрамовский, В. И. Самуся // – К.: Наукова думка., 1990, – 172 с.

63. Завозин Л.Ф. Шахтные подъемные установки. Изд. 2-е, переработ. и доп. М. , «Недра», 1975, 368 с.

64. Карпышев Н.С. Тормозное устройство шахтных подъемных машин. Изд-во «Недра» 1968 г., 248 с.

65. Филимонов В.Н., Тутубалин Р.Ю. Проектирование электромеханического тормозного привода // Материалы Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», Владимир, 14–16 ноября 2012 г. – М. : Изд-во РАН, 2012. – 240 с.

66. Чернова Е.Н. Приближенная математическая модель вентильно-индукторного двигателя: Тез. докл. «ЭКАО 99». -М.: Изд-во МЭИ, 1999.
67. 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.
68. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. - 312 с.
69. Красовский А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис. доктора техн. наук. М., 2004. - 40 с.
70. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 2003. - № 3. -С. 35-44.
71. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control- Magna physics publishing and Clarendon press. Oxford, 1993.
72. Stephenson J.M., Blake R.J., "The Characteristics, Design and Applications of Switched Reluctance Motors and Drives," Seminar 5, PCIM93, ND, June 1993.
73. Правила безопасности в угольных шахтах. М.: Недра, 2002.
74. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. М.: Недра, 1976. 304 с.
75. Петрушин А.Д., Янов В.П. Оптимизация режимов работы тягового вентильно-индукторного двигателя// Электромеханика. -1999,- № 3.

76. Филимонов В.Н., Крылов А.В., Тутубалин Р.Ю. Математическая модель электромеханического тормозного привода // Материалы Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», Владимир, 14–16 ноября 2012 г. – М. : Изд-во РАН, 2012. – 240 с.

77. Нгуен Чонг Хай, Нгуен Мань Туан Математическая модель электромеханической системы тормозного устройства с реактивно-вентильным электродвигателем // IX Региональная молодежная научно-практическая конференция "Молодежные инновации" в ТулГУ, 2015 – С.

78. Просвирин Б.К. Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением М.: ТРАНСИЗДАТ, 2000. - 328с.

79. Степанов В.М., Маркова Т.А., Серёгин И.Н. Различные подходы к оптимизации сложных электромеханических систем. Изд-во ТулГУ. 2005. 40 с.

80. Голландцев Ю. А. Особенности проектирования микропроцессорных систем управления электрическими машинами. Сб. «Микропроцессорные системы управления технологическими процессами». Л.: ЛДНТП. 1985.

81. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления/ пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

82. Степанов В.М. Обоснование технологических и конструктивных параметров гидрофицированных крепей на основе обеспечения надёжности их работы: Диссертация доктор техн. наук. Тула, 1994. – 557 с.

83. Остриков В.В., Уткин С.Ю. Сравнительный анализ схем силовых преобразователей для вентильно-индукторного электропривода массового применения // «Приводная техника», 2000, № 4.

84. Суднова В.В. Качество электрической энергии М.: ЗАО Энергосервис, 2000. - 80 с.

85. В.Ф. Ермаков Качество электроэнергии, 2012 г. 192 с;

86. Завьялов В.М. Стабилизация упругого момента в двух- массовой механической системе / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, И.А. Куприянов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды третьей всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 98-101

87. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. Численные методы. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Ч.2, Московский государственный университет леса, М.: 2005, 109 с.

88. Новиков Е.А. Явные методы для жестких систем Новосибирск, «Наука», Сибирское предприятие РАН, 1997 - 195 с.

89. Андриевский Б.Р., Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab /Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков - СПб.: Наука, 2000. - 475 с

90. С. Герман-Галкин, Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учебное пособие /С.Г. Герман-Галкин - СПб: КОРОНА принт, 2001. - 320с.

91. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

92. Степанов В. М. Обоснование технологических и конструктивных параметров гидрофицированных крепей на основе обеспечения надежности их работы: дис. ... д-ра техн. наук, 05.05.06 /В. М. Степанов - Тула, 1994. - 557 с.

93. Веселов П.В. Повышение эффективности функционирования электрогидроусилительного агрегата рулевого управления автотранспортных средств: дис. ... канд. техн. наук, 05.09.09./ П.В. Веселов; Тул. гос. ун-т, Тула, 2013. – 104 с.

94. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с

95. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие / К. К. Васильев, М. Н. Служивый. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170 с

96. 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.

97. 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.