

На правах рукописи



НЕЙМАН ЛЮДМИЛА АНДРЕЕВНА

ЛИНЕЙНЫЕ СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАШИНЫ
ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ УДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на кафедре «Электротехнические комплексы»

- Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Щуров Николай Иванович
- Официальные оппоненты: **Певчев Владимир Павлович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет» профессор кафедры «Промышленная электроника»
- Саттаров Роберт Радилович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор кафедры «Электромеханика»
- Абрамов Андрей Дмитриевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится «18» октября 2018 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16821.

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.173.04. E-mail: d212.173.04@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.04
кандидат технических наук



М.А. Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время среди актуальных задач экономики России важное место отводится решению вопросов комплексной механизации и автоматизации технологических процессов и производств, повышению качества, надежности, снижению массогабаритных показателей, себестоимости машин и оборудования, задействованного в данных процессах.

Среди прогрессивных видов оборудования, применяемого в машиностроении, строительстве, горном деле и т.д., особое место, как менее энергоемкие, занимают виброимпульсные системы, в которых в качестве технических средств наряду с гидравлическими и пневматическими системами широко применяются электрические импульсные системы с линейной траекторией движения рабочих органов, наиболее полно отвечающие требованиям непосредственного привода.

Применение подобных электрических импульсных систем в машинах и оборудовании с колебательным движением рабочих органов позволяет упростить кинематическую цепь машины за счет исключения передаточных механизмов преобразования вида движения и обеспечить наилучшие условия интеграции приводного двигателя и рабочего органа машины, имеющего возвратно-поступательный характер движения.

К настоящему времени накоплен большой опыт решения вопросов расчета и практической реализации линейных электрических импульсных систем. Важный вклад в решении общих вопросов внесли: О.Д. Алимов, П.М. Алабужев, Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковалёв, В.В. Ивашин, Ф.Н. Сарапулов, О.Н. Веселовский, А.В. Сапсалёв, Г.Г. Угаров, Б.Ф. Симонов, Б.Н. Лобов, А.В. Павленко, В.П. Певчев, В.А. Каргин, А.Д. Абрамов, Е.Г. Андреева, А.Н. Мирошниченко, Р.Р. Саттаров, В.К. Манжосов, К.М. Усанов, В.И. Мошкин, А.И. Смелягин и другие специалисты.

Среди электрических импульсных систем, как наиболее пригодные для привода машин ударного действия, широкое распространение получили системы, содержащие в своей основе линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД).

За полувековой период активного практического использования ЛЭМД в качестве основных структур машин ударного действия была выявлена большая эффективность их использования для интенсификации целого ряда технологических процессов с частотой воздействия ударных импульсных сил до 50 с^{-1} и средней энергией удара до 100 Дж. Целесообразность их применения обусловлена, прежде всего, простотой конструктивного исполнения и возможностью улучшения массогабаритных характеристик за счет упрощения кинематической схемы машины.

В процессе эволюции ударных и виброударных машин на основе ЛЭМД, как обладающие наибольшими значениями КПД (до 46%), хорошо себя зарекомендовали синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте промышленной сети с преобладающей для основной массы машин энергией удара 0,7...40,0 Дж и синхронной частотой ударов $16,7...50 \text{ с}^{-1}$ (1000...3000 уд/мин).

В настоящее время созданы различные структурные разновидности импульсных машин и устройств на основе СЭМУД, различающиеся способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, а также конструкторско-технологическими решениями, повышающими их надежность, производительность, экономичность, улучшающие эксплуатационные характеристики, а лучшие из них доведены до уровня промышленного производства.

Значительный вклад в создании этих машин внесли: А.И. Москвитин, А.В. Фролов, Е.М. Тимошенко, А.П. Тронов, А.Т. Малов, Б.Г. Гольдштейн, А.А. Перьев и др. специалисты.

Перспективность использования импульсных электромагнитных машин данного класса можно объяснить следующими дополнительными преимуществами:

- работа в околорезонансных режимах обеспечивает относительно высокие значения КПД, что является важным фактором в вопросах энергосбережения;
- имеют высокую удельную ударную мощность, в два и более раз превосходящую по данному показателю электромагнитные ударные машины иного принципа действия;
- возможность создания электромагнитных ударных узлов с высокой удельной энергией удара в условиях ограничения амплитуды тока и снижения негативного влияния работы на питающую промышленную сеть без использования для этого специальных накопителей энергии;
- имеют наиболее простое решение в вопросах защиты от вибрации и обеспечивают наибольшую стабильность выходных характеристик;
- ударный узел СЭМУД представляет собой готовое для применения техническое устройство ударно-вибрационного воздействия, которое может быть по необходимости интегрировано в технологический процесс.

Вместе с тем, несмотря на перспективность практического использования СЭМУД, теоретические исследования, выполненные в разное время для данного класса машин, имеют разобщенный характер. Методики расчета и оптимального проектирования СЭМУД основаны в своем большинстве на применении статических подходов, касающиеся только силовой части СЭМУД или её отдельных узлов, что не всегда позволяет в достаточной степени точности оценить происходящие в них процессы, зависящие от скорости и степени подвижности инерционных масс, свойств упругих связей, потерь энергии в электромеханической системе и т.д. с учетом ударных взаимодействий.

Между тем любая электромеханическая система СЭМУД, использующая в своем составе ЛЭМД, устройства для передачи энергии ударом, гашения вибраций и реверса ударной массы бойка, представляет собой сложную и многосвязанную динамическую систему с большим набором входных переменных. Данная система определяет структуру и исполнение СЭМУД, обеспечивающей наиболее рациональное формирование ударного импульса силы при передаче его в деформируемую среду. Упрощение связей в такой системе ограничивает возможности анализа и синтеза СЭМУД, работающих исключительно в переходных квазиустановившихся режимах.

Таким образом, существующее противоречие между потребностью в практической реализации вариантов СЭМУД, с одной стороны, и недостаточно развитыми общей теорией машин и методами для их анализа, с другой стороны, являются одним из сдерживающих факторов создания и совершенствования машин этого класса. Решение указанной комплексной проблемы является актуальной задачей проводимых исследований и представляет научный и практический интерес.

Цель диссертационной работы – решение комплексной научно-технической проблемы создания и совершенствования низкочастотных синхронных электромагнитных машин ударного действия, развитие общей теории машин, методов анализа и синтеза, направленных на повышение эффективности процесса электромеханического преобразования и передачи энергии в технологических производственных процессах при взаимодействии с деформируемой средой.

Для достижения цели поставлены следующие **основные научные задачи**:

1. Выявить тенденции преимущественного применения вариантов конструктивных схем СЭМУД и классифицировать их по способу реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка.

2. Развить принципы построения схем СЭМУД и разработать новые технические решения, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик и энергетических показателей. Обосновать новые рабочие циклы СЭМУД и реализовать на их основе новые способы управления.

3. Разработать методику количественной и качественной оценки сравнения вариантов ЛЭМД с произвольной конфигурацией магнитной цепи.

4. Обосновать перспективность метода определения пределов рационального применения разновидностей ЛЭМД для импульсных систем по распространенному в практике показателю «конструктивный фактор» из анализа расчетных тяговых характеристик, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

5. Дать количественную оценку степени влияния определяющих величин на значения показателя «конструктивный фактор» и показателя экономичности при выборе ЛЭМД.

6. Выполнить анализ энергопреобразовательных процессов различных вариантов конструктивных схем СЭМУД, установить особенности и закономерности этих процессов при передаче кинетической энергии бойка.

7. Установить из условия допустимого нагрева связи между энергией удара и частотой ударов СЭМУД в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле. Разработать методики приближенного теплового расчета с целью оптимизации работы СЭМУД, обусловленной заданным рабочим процессом.

8. Дать комплексную оценку силам, противодействующим ускорению бойка, и потерям энергии в электромеханической системе, определяющим эффективность процесса передачи кинетической энергии, и разработать их точные математические аналоги.

9. Разработать модели и алгоритмы расчета потерь мощности от вихревых токов в массивном магнитопроводе в переходных режимах для различных законов формирования напряжения на входе электромагнитной импульсной системы.

10. Разработать математические модели электромеханической колебательной системы (ЭМКС) с ЛЭМД, учитывающие потери энергии, нелинейности характеристик магнитных материалов, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей механической системы, и реализовать универсальный алгоритм расчета без учета ударного взаимодействия.

11. Разработать единый методологический подход к математическому описанию различных вариантов схем СЭМУД, отличающихся различными способами организации возвратно-поступательного движения бойка с учетом ударного взаимодействия в механической системе, и создать их компьютерные модели.

Область исследования – разработка научных основ создания и совершенствования СЭМУД, методов для их анализа и синтеза, подходов, обеспечивающих проектирование в составе рабочих виброударных комплексов.

Объект исследования – силовые электромагнитные импульсные машины для генерации и передачи периодических ударных импульсов сил в деформируемую среду с частотой воздействия, кратной частоте промышленного источника электроэнергии.

Предмет исследования – электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы вариантов конструктивных схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения бойка в рабочем цикле машины с учетом ударного взаимодействия.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы методы исследования выбирались исходя из постановок решения задач с учетом особенностей исследуемых объектов. В работе использовались фундаментальные законы электротехники, методы математического анализа и имитационного моделирования, метод конечных разностей и дискретных преобразований, методы оптимизационного проектирования и физического моделирования, методы аналитической механики и импульсных систем. Для решения ряда задач оптимизационного и теплового расчета использовался пакет MathCad. Для расчета магнитных и тепловых полей применялись стандартные программы FEMM и ELCUT. Решение задач динамики реализовано методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink.

Достоверность полученных результатов исследований определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследованиях математических моделей, методов и алгоритмов, срав-

нением результатов расчета с данными физического моделирования и сопоставлением с данными исследований других авторов.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Развита научная концепция синхронной электромагнитной импульсной системы, включающей линейный электромагнитный двигатель, устройства для импульсного преобразования и передачи механической энергии бойка с частотой вынужденных колебаний, кратной частоте промышленного однофазного источника 50 Гц, что повышает эффективность процесса электромеханического преобразования энергии в технологических производственных процессах при взаимодействии с деформируемой средой.

2. Разработана методика количественной и качественной оценки при сравнении вариантов цилиндрических ЛЭМД одинакового объема и веса активных материалов, имеющих произвольную конфигурацию магнитной цепи, которая наиболее полно отражает тенденции преимущественного выбора как известных, так и новых вариантов схем, по широкой группе общепринятых показателей, применяемых в задачах проектирования.

3. Обоснована перспективность метода определения пределов рационального применения разновидностей ЛЭМД с использованием зависимостей показателя экономичности в функции показателя «конструктивный фактор», полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля, что расширяет возможности и границы существующего метода и повышает качество результатов в задачах проектирования. Впервые на примере расчета магнитного поля типовой конструкции цилиндрического ЛЭМД дана количественная оценка степени влияния определяющих величин на значения показателя «конструктивный фактор»

4. Выявлена целесообразность выбора ЛЭМД для привода СЭМУД вести по широко распространенному в практике значению показателя «конструктивный фактор», используя установленные связи между условиями максимального выигрыша в расходовании активных материалов, с одной стороны, и конфигурацией исполнения магнитной системы и ее основными геометрическими соотношениями размеров, с другой стороны.

5. Предложены новые рабочие циклы и реализованы на их основе способы управления СЭМУД, позволяющие в разной степени ограничивать амплитуду тока и негативное влияние на питающую промышленную сеть. Развита конструкция конструктивных схем СЭМУД и разработаны новые технические решения, направленные на повышение надежности, производительности, энергии удара и КПД, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

6. На основе баланса энергии электромеханической системы выполнен качественный анализ энергопреобразовательных процессов за полный рабочий цикл СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, поясняющих закономерности протекающих процессов взаимного преобразования электрической, магнитной, кинетической, потенциальной энергии, и дополняющий базовые знания фундаментальных положений теории импульсных электромагнитных машин, составляющие научные основы для их создания и совершенствования.

7. Получены приближенные расчетные выражения и разработаны на их основе методики расчета, устанавливающие из условия допустимого нагрева и колебаний температуры в рабочем цикле связи между энергией и частотой ударов, количеством произведенных рабочих циклов с заданной частотой и энергией ударов, теплофизическими свойствами и геометрическими размерами СЭМУД, в зависимости от начального превышения температуры над температурой окружающей среды.

8. Выработаны рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения и дана количественная оценка ее отдельных компонент по отношению к движущей силе электромагнитной машины в зависимости от магнитной асимметрии, возникающей вследствие разности предельных отклонений размеров сопрягаемых элементов

конструкции магнитопровода электромагнитной машины. Выполнена модернизация известного в практике выражения по определению силы одностороннего магнитного притяжения, что расширяет возможности существующего метода расчета относительно установленных ограничений по эксцентриситету.

9. Разработаны варианты моделей магнитной цепи с массивным магнитопроводом, позволяющие рассчитывать в нестационарных режимах потери мощности от вихревых токов в зависимости от закона формирования напряжения на входе электромеханического преобразователя и насыщения ферромагнитных участков, и реализованы на их основе алгоритмы расчета, обеспечивающие высокую вычислительную устойчивость при реализации методами структурного моделирования.

10. Разработаны математические и компьютерные модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД, обеспечивающие широкие возможности всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах при возбуждении вынужденных периодических колебаний системы с частотой до 100 с^{-1} , сопровождаемых различного рода потерями энергии и зависящих от нелинейности магнитных характеристик, потоков рассеяния, степени подвижности инерционных масс, свойств упругих связей, внешних воздействий, с большим набором входных и выходных переменных, реализованные методами структурного моделирования.

11. Разработан единый методологический подход к математическому описанию различных вариантов СЭМУД и созданию их компьютерных моделей, наиболее точно отражающих динамическое состояние электромеханической системы с потерями энергии при возбуждении периодических ударных импульсов сил, что обеспечивает широкие возможности анализа и синтеза моделей методами структурного моделирования с большим набором входных и выходных переменных.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты представляют собой новые научно обоснованные технические решения, рекомендации, методики, модели и алгоритмы расчета, внедрение которых вносит существенный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области разработки СЭМУД. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Доказаны положения, расширяющие представление о силовой электромагнитной импульсной системе, использующей в своем составе ЛЭМД, устройства для передачи и преобразования кинетической энергии бойка с частотой ударных импульсов сил, равной или кратной частоте промышленной сети.

2. На основе единого методологического подхода разработан комплекс математических и компьютерных моделей (в Matlab Simulink) многомассовых ЭМКС с ЛЭМД и вариантов конструктивных схем СЭМУД, ориентированных на исследования электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах и обеспечивающих широкие возможности для анализа и синтеза, внедрение которых в практику проектирования позволит сократить сроки выполнения проектных работ и повысить их качество.

3. Развита принципы построения конструктивных схем СЭМУД, обоснованы новые рабочие циклы электромагнитных машин и реализованы на их основе новые способы управления, на уровне изобретений разработан комплекс технических решений, направленный на повышение надежности, производительности, энергетических показателей, электромагнитной совместимости при питании от промышленных источников электроэнергии.

4. Развита подходы оптимального проектирования ЛЭМД для привода СЭМУД, наиболее точно отражающие тенденции преимущественного выбора вариантов конструктивных схем из условия экономичности в расходовании активных материалов.

5. Разработаны инженерные методики приближенного расчета выходных параметров рабочего процесса СЭМУД, способствующие решению вопросов управления их тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы реализованы в виде разработок макетных образцов, методик и компьютерных моделей, выполненных при непосредственном участии автора. Выполнение диссертационной работы осуществлялось в соответствии с планами и заданиями госбюджетных НИР, в частности, в рамках реализуемой в различные годы программы стратегического развития НГТУ, определяющих формирование научно-технического задела по приоритетным направлениям развития науки. Проект 2.2.2. Решение комплексных проблем по направлению «Энергоэффективность и энергосберегающие технологии»:

– тема НИР: «Силовые устройства электромеханики для технологических виброимпульсных систем с электромагнитным возбуждением» (№ гос. регистрации 01201250403 от 13.01.2012 г.);

– тема НИР: «Электромагнитные генераторы силовых импульсов для технологического оборудования» (№ гос. регистрации 01201362096 от 14.05.2013 г.);

– тема НИР: «Линейные электромеханические преобразователи с повышенными энергетическими показателями» (№ гос. регистрации 01201461863 от 22.04.2014 г.);

– тема НИР: «Развитие методов и технологий компьютерного моделирования многомассовых электромеханических систем виброударного действия» (№ гос. регистрации АААА-А17-117041710178-8 от 17.04.2017 г.).

В рамках выполнения тематического плана НИР НГТУ:

– тема НИР: «Разработка моделей для расчета электромеханических устройств и электроустановок» (№ гос. регистрации 116012010095 от 20.01.2016 г.);

– тема НИР: «Электромеханические колебательные системы с электромагнитным возбуждением» (№ гос. регистрации АААА-А17-117071220014-8 от 12.07.2017 г.)

Предложенные для реализации практические разработки, методики расчета и рационального проектирования СЭМУД обусловили их востребованность в ЗАО «ЭРАСИБ» г. Новосибирск, ИГД СО РАН г. Новосибирск.

Материалы диссертации нашли применение в учебном процессе при разработке лекционного курса «Электрические и электронные аппараты», выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ для студентов направлений 130302 и 130402 - Электроэнергетика и электротехника ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Новые технические решения в исполнении вариантов СЭМУД, разработанные новые рабочие циклы и реализованные на их основе способы управления, использование которых позволяет повысить надежность, производительность, энергию удара, КПД и снизить их негативное влияние на питающую сеть.

2. Определение пределов рационального применения разновидностей ЛЭМД для СЭМУД целесообразно вести по распространённому в практике показателю «конструктивный фактор», используя установленные зависимости между видом тяговой характеристики и конфигурацией исполнения магнитной цепи, полученные с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

3. Результаты исследований энергопреобразовательных процессов вариантов конструктивных схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка и поясняющие закономерности процессов электромеханического преобразования энергии за полный рабочий цикл, составляющие научные основы для их создания и совершенствования.

4. Разработанные методики приближенного расчета рабочего процесса СЭМУД, обеспечивающие из условия допустимого нагрева решение вопросов управления их тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины.

5. Результаты исследований и рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения сопрягаемых некоаксиальных элементов конструкции ЛЭМД, количественной и качественной оценки этой силы и её отдельных компонент по отношению к движущей силе в зависимости от возникающей магнитной асимметрии.

6. Алгоритмы расчета и варианты моделей по учету в нестационарных режимах потерь мощности в массивном магнитопроводе от вихревых токов в зависимости от насыщения ферромагнитных участков и закона формирования напряжения на входе электромеханического преобразователя, реализованные методами структурного моделирования.

7. Математические и компьютерные модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД, реализованные методами структурного моделирования, обеспечивающие широкие возможности анализа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах, сопровождаемых различного рода потерями энергии, и зависящих от нелинейности магнитных характеристик потоков рассеяния, степени подвижности инерционных масс, свойств упругих связей и внешних воздействий, с большим набором входных и выходных переменных.

8. Методологический подход к математическому описанию различных вариантов конструктивных схем СЭМУД, отличающихся способами реализации возвратно-поступательного движения бойка, и их компьютерные модели, наиболее полно и точно отражающие состояние электромеханической системы с потерями энергии электрической, магнитной и механической природы при возбуждении периодических ударных импульсов сил, и обеспечивающие широкие возможности для решения задач анализа и синтеза.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: the 3rd, 4th, 8th, 10th, 11th – International Forum on Strategic Technology, IFOST-2008 (Russia, Novosibirsk–Tomsk, 2008); IFOST-2009 (Vietnam, Ho Chi Minh City, 2009); IFOST-2013 (Mongolia, Ulaanbaatar, 2013); IFOST-2015 (Indonesia, Bali, Yogyakarta, 2015); IFOST 2016 (Russia, Novosibirsk, 2016); II научно-практической конференции с международным участием «Инновационная энергетика» (Россия, Новосибирск, 2010); XIV, XV, XVI международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-2012, МКЭЭЭ-2014, МКЭЭЭ-2016 (Россия, Крым, Алушта 2012, 2014, 2016); VI международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (Россия, Томск, 2013); I международной (IV- всероссийской) научно-практической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Башкортостан, Уфа, 2013); IX международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» (Россия, Омск, 2013); VII международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Россия, Томск, 2013); III международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (Россия, Екатеринбург, 2014); II, III, IV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (Россия, Новосибирск, 2014, 2015, 2016, 2017); Th 17th, Th 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM–2016, EDM–2017 (Russia, Altai, Erlagol, 2016, 2017); VIII международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Россия, Новосибирск, 2017).

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертационного исследования – 90, из которых 37 входят в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ для докторских диссертаций, 8 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель, 9 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS и Web of Science, 35 публикаций в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 400 страницах машинописного текста и состоит из введения, шести глав, заключения, 4 приложений, 220 рисунков, 12 таблиц, списка использованных источников, который содержит 244 наименования.

Соответствие паспорту специальности. Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, соответствуют области исследования, приведенной в паспорте специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, а именно:

- анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов;
- разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов;
- разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии;
- разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отражено современное состояние проблемы, сформулированы цель и задачи для ее достижения, определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту, указана теоретическая и практическая значимость результатов работы, соответствие паспорту специальности, приведена информация по апробации работы и публикациям.

В первой главе рассмотрено современное состояние и методология построения циклических синхронных электромагнитных машин ударного действия, использующих в своей основе импульсный ЛЭМД, в которых процесс генерации ударных импульсов сил осуществляется в результате возвратно-поступательного движения ударной массы, периодически взаимодействующего через промежуточное тело с деформируемой средой.

Приведен обзор и технические показатели ранее созданных СЭМУД различного технологического назначения. Из анализа показателей для основной массы машин следует, что диапазон изменения по энергии удара составляет 0,7...40 Дж, а по ударной мощности – 35...1000 Вт, при этом коэффициент полезного действия колеблется в диапазоне значений 28...45 %, и не превышает 50%.

Рассмотрена тенденция преимущественного применения вариантов схем СЭМУД, для которых частота периодических колебаний бойка равна или кратна частоте промышленной сети, которая одновременно является синхронизирующим источником сигнала. Выполнен структурный анализ и дана краткая характеристика существующих и новых вариантов схем СЭМУД, свидетельствующие о многообразии исполнения по способу организации возвратно-поступательного движения бойка. Показано, что любая электромеханическая система СЭМУД, использующая в своем составе ЛЭМД, устройства для передачи энергии ударом, гашения вибраций и реверса ударной массы бойка, представляет сложную динамическую систему, определяющую структуру и исполнение ударного узла, обеспечивающего наиболее рациональное формирование ударного импульса силы и его передачу в деформируемую среду.

На уровне изобретений предложены новые технические решения вариантов схем СЭМУД и реализованы на их основе новые способы управления в рабочем цикле машины. Первая группа технических решений направлена на улучшение эксплуатационных характеристик СЭМУД, как повышение их надежности и производительности за счет снижения динамических перегрузок, вибраций и искусственного поддержания режима вынужденных колебаний бойка при отклонениях от рабочего режима, нарушающих цикличность работы ударного узла. Вторая группа технических решений направлена на повышение энергетических показателей, а также улучшение электромагнитной совместимости при питании от промышленных источников электроэнергии за счет повышения точности синхронизации по времени длительности протекания тока в катушках со вре-

менем движения бойка под действием электромагнитных сил этих катушек, уменьшения массы промежуточного звена при передаче энергии ударом, реализации новых рабочих циклов и способов управления, характеризующихся определенной последовательностью чередования импульсов напряжения.

Для оценки вариантов цилиндрических ЛЭМД одинакового объема и веса активных материалов, имеющих произвольную конфигурацию профиля магнитной цепи, разработана методика сравнения вариантов между собой по широкой группе показателей применяемых в задачах проектирования. При сравнении в отношении расхода активных материалов применялся показатель добротности (экономичности), определяемый как отношение массы ЛЭМД – $M_{эм}$ к максимальной условной полезной работе – A_y :

$$Д = \frac{M_{эм}}{A_y}.$$

Показано, что рациональный выбор ЛЭМД для СЭМУД целесообразно вести по широко распространенным в практике значениям показателя «конструктивного фактора», используя установленные связи между условиями максимального выигрыша в расходовании активных материалов, с одной стороны, и конструктивным исполнением и основными геометрическими соотношениями размеров, с другой стороны.

Значения показателя «конструктивный фактор» (КФ), введенного Ротерсом, определялось как отношение корня квадратного из оптимальной силы – $F_{опт}$ к величине оптимального рабочего хода – $x_{опт}$

$$КФ = \frac{\sqrt{F_{опт}}}{x_{опт}}.$$

Возможности использования известного метода ограничены существующими пределами рационального применения типовых магнитных систем и одинаковыми значениями приводимой полезной работы и нагрева для длительного режима.

Для расширения границ и возможностей известного метода, а также повышения качества этого выбора в задачах проектирования установлена целесообразность использования данных для расчета значений показателя КФ из анализа расчетных значений тяговых характеристик, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

На примере расчета магнитного поля типовой конструкции цилиндрического ЛЭМД получена количественная оценка степени влияния определяющих факторов, вызванных изменениями нагрева, активного объема подобных систем, соотношений главных размеров на значения показателя $КФ(x, y)$ и добротности $Д(x, y)$ в отношении расходования активных материалов. В качестве примера построения на рисунке 1 и рисунке 2 приведена в масштабе геометрическая структура моделей и картина распределения поля линий магнитного потока, используемых для оценивания влияния соотношения главных размеров $x = \frac{d_1}{d_2}$ и $y = \frac{l_k}{d_2}$, применяемых при моделировании, где d_1 – диаметр сердечника бойка; d_2 – наружный диаметр обмотки катушки; l_k – длина катушки.

Полученные с помощью полиномиальной регрессии зависимости $Д(x, y)$ и $КФ(x, y)$ для случая $y = const$ приведены на рисунке 3 и рисунке 4.

Из зависимостей следует, что для ЛЭМД, соответствующего наименьшему расходу активных материалов, отклонение от указанного экстремума (рисунок 3) на 10% ($x = 0,45 \dots 0,55$) приведет к отклонению показателя $КФ = 380 \dots 415 \sqrt{H}/м$ (рисунок 4), т.е. не более чем на 5 %.

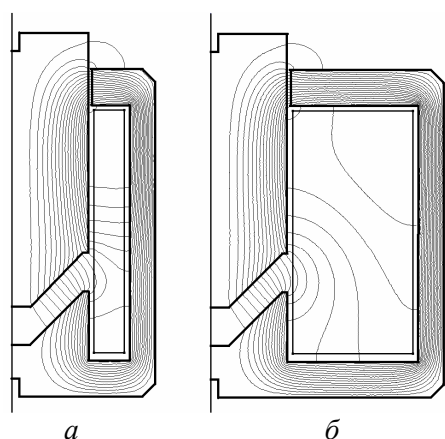


Рисунок 1 – Геометрическая структура моделей при $y = \text{const}$:

a – для $\frac{d_1}{d_2} = 0,681$; b – для $\frac{d_1}{d_2} = 0,368$.

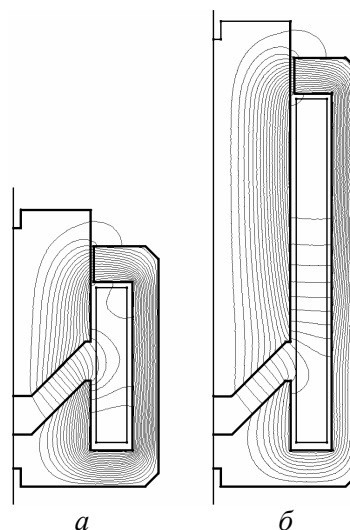


Рисунок 2 – Геометрическая структура моделей при $x = \text{const}$:

a – для $\frac{l_k}{d_2} = 0,73$; b – для $\frac{l_k}{d_2} = 1,46$

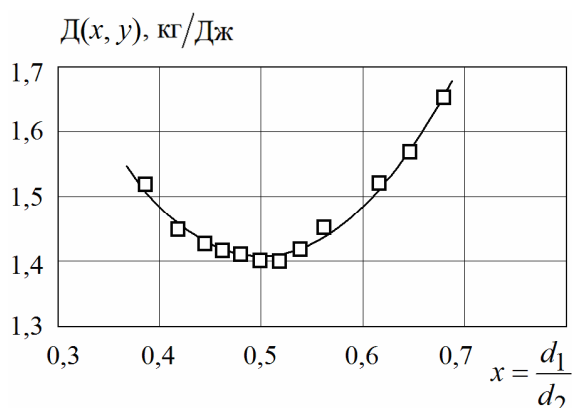


Рисунок 3 – Зависимость показателя экономичности от соотношения размеров $x = d_1/d_2$

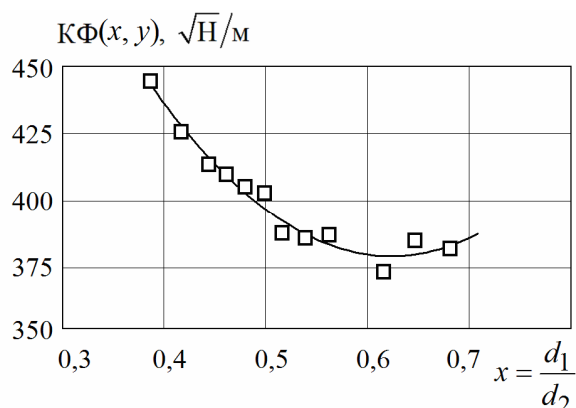


Рисунок 4 – Зависимость конструктивного фактора от соотношения размеров $x = d_1/d_2$

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют об имеющейся возможности повышения точности известного метода и расширения номенклатурного ряда разновидностей ЛЭМД, ограниченного в настоящее время только типовыми конструкциями магнитных систем.

Во второй главе на основании установленных принципов построения известных и новых вариантов схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, рассмотрен качественный анализ процессов энергопреобразования за полный рабочий цикл.

Анализ энергопреобразования выполнен на основе баланса энергии электромеханической системы преимущественно для одно- и двухкатушечных вариантов СЭМУД, что в сочетании с физической наглядностью происходящих в них процессов позволяет понять закономерности взаимного преобразования различных видов энергии и дополняет базовые знания фундаментальных положений теории импульсных циклических электромагнитных машин, которые составляют научные основы для их создания и совершенствования.

При анализе рабочих циклов машин в равной степени уделялось внимание особенностям построения вариантов схем СЭМУД и общим закономерностям энергопреобразования при передаче энергии ударом в режиме вынужденных колебаний механиче-

ской системы. На диаграммах рисунков 6–11 обозначено: $u_{рх}$, $i_{рх}$ – напряжение и ток катушки прямого (рабочего) хода; $u_{ох}$, $i_{ох}$ – напряжение и ток катушки обратного хода. Ударный узел СЭМУД объединяет в себе набор стандартных элементов магнитной и механической подсистем: рабочий инструмент – 1; определяющий ударную массу боек – 2; магнитопровод – 3; устройство остановки и реверса бойка в виде безынерционного упругого звена (пружины) – 4, либо совмещенного с пружиной массивного инерционного преобразователя – 7; намагничивающую катушку – 5 в варианте схемы на рисунке 7 и намагничивающих катушек прямого – 5 и обратного – 6 хода в вариантах схем на рисунках 6–11.

Имеющиеся различия в вариантах схем имеет существенное значение при определении способа реализации возвратно-поступательного движения бойка, что является вынужденной мерой при согласовании поступающих на систему катушек импульсов напряжения, подача которых должна быть синхронизирована по времени с пространственными координатами положения бойка.

Установлено, что применение упругого звена для преобразования кинетической энергии ударной массы бойка в потенциальную при обратном ходе, с последующим преобразованием в кинетическую энергию в период рабочего хода, позволяет в разной степени ограничить амплитуду тока и снизить негативное влияние работы циклической машины на питающую промышленную сеть. Вследствие того, что остановка с удержанием бойка в одном из крайних положений рабочим процессом не предусмотрена, то КПД СЭМУД в своем классе линейных электромагнитных машин может достигать предельных значений 40 % и более.

Снижение амплитуды тока в вариантах схем СЭМУД на рисунках 5–7 достигается за счет использования за время рабочего цикла двух полувольт напряжения питающего источника. При этом реализация рабочего цикла с двухсторонним свободным выбегом бойка (рисунок 5) обеспечивает частоту ударов $n_{уд} = 25 \text{ с}^{-1}$ (1500 уд/мин), а для двухкатушечных вариантов СЭМУД на рисунке 6 и рисунке 7 – $n_{уд} = 50 \text{ с}^{-1}$ (3000 уд/мин).

Более значительные снижения амплитуды тока удастся достичь в варианте схемы на рисунке 8, в рабочем цикле которого используется три полуволны напряжения, что обеспечивает синхронную частоту ударов бойка $n_{уд} = 33,3 \text{ с}^{-1}$ (2000 уд/мин).

Варианты СЭМУД, реализующие рабочие циклы со свободным выбегом бойка на рисунках 8–11, отличают более широкие возможности в ограничении амплитуды тока. Для реализации рабочих циклов этих машин применяется система из двух катушек, обеспечивающих ускорение ударной массы бойка электромагнитными силами в прямом и обратном направлениях с односторонним или двухсторонним выбегом бойка за пределы полюсов катушки в период бестоковой паузы. Боек получает необходимую кинетическую энергию за счет различной вариации в подаче трех и более электрических импульсов напряжения, что позволяет ограничить амплитуду тока, и снизить негативное влияние СЭМУД на питающую сеть.

В двухкатушечном варианте на рисунке 11 использование нового рабочего цикла допускает понижение частоты ударов бойка до $n_{уд} = 16,7 \text{ с}^{-1}$ (1000 уд/мин). Для реализации рабочего цикла используются четыре полуволны напряжения источника.

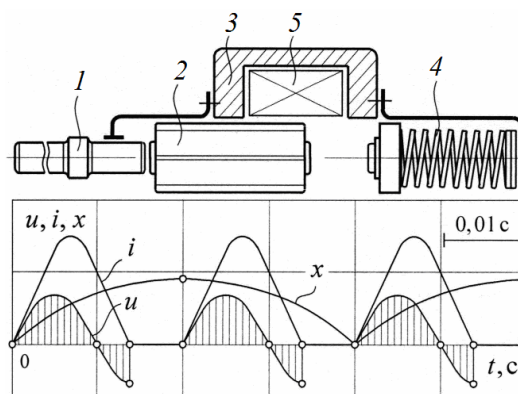


Рисунок 5 – Однокатушечная СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка

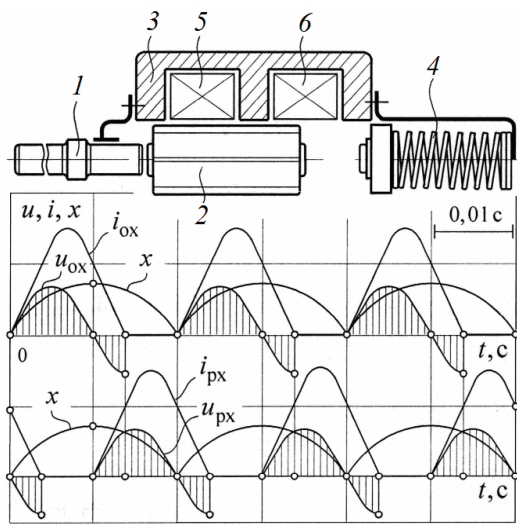


Рисунок 6 – Двухкатушечная СЭМУД с безынерционным упругим реверсом бойка

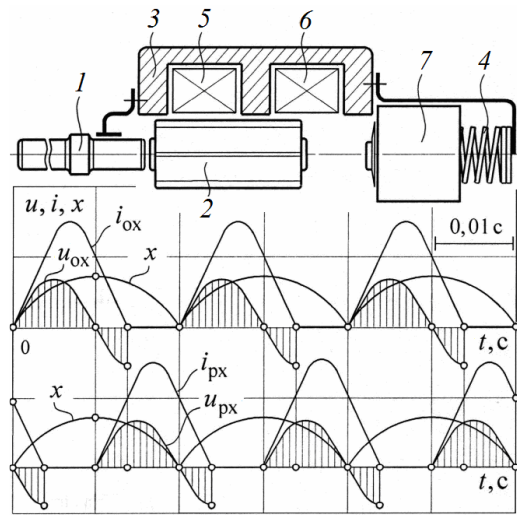


Рисунок 7 – Двухкатушечная СЭМУД с инерционным реверсом бойка

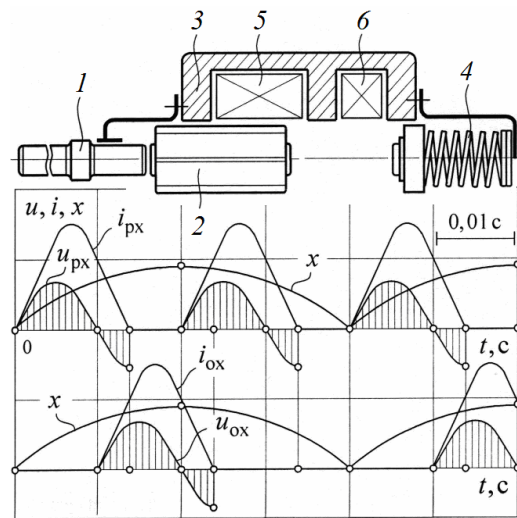


Рисунок 8 – Двухкатушечная СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

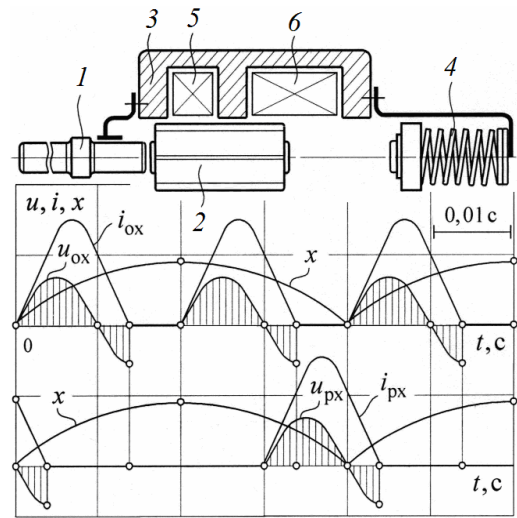


Рисунок 9 – Двухкатушечная СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода

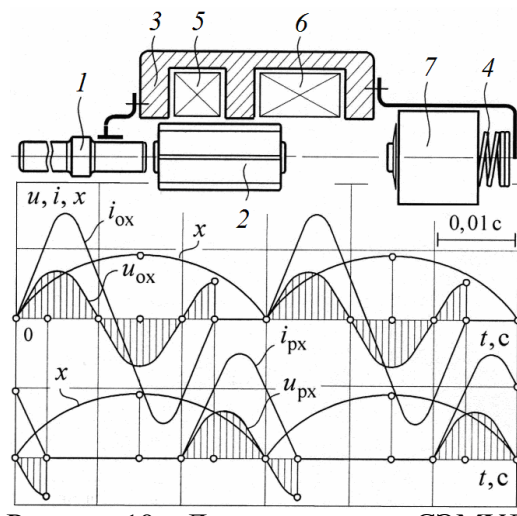


Рисунок 10 – Двухкатушечная СЭМУД с пониженной частотой ударов

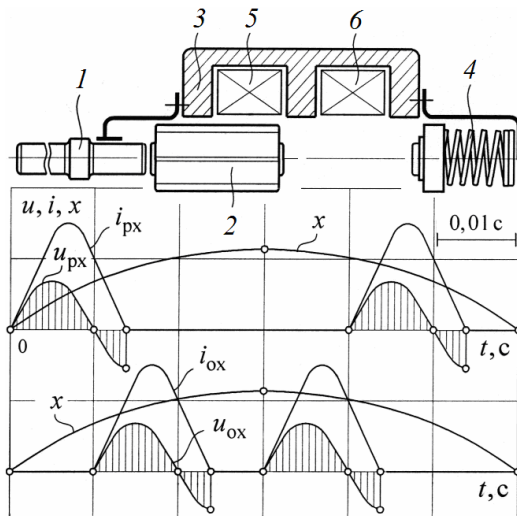


Рисунок 11 – Двухкатушечная СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка

Наибольшее практическое применение получили варианты конструктивных схем СЭМУД и реализованные на их основе рабочие циклы на рисунках 5–7. Большая заслуга в этом учёных Н.П. Ряшенцева и Е.М. Тимошенко. Диапазоны распределения показателей, полученных на основе анализа характеристик созданных машин и применяемых преимущественно в ударном электроинструменте, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазоны распределения показателей СЭМУД

Показатель	с одной катушкой	с двумя катушками
Энергия удара: A_y , Дж	3...4	2,5...6
Ударная мощность: P_y , Вт	75...100	100...315
КПД: η , %	31...42	31...45
Удельная энергия удара: A_y / M , Дж/кг	0,89...1,43	0,83...1,47
Удельная ударная мощность: P_y / M , Вт/кг	22,6...35,7	44,6...73,3
Частота ударов бойка: s^{-1}	25	50

Анализ рабочих циклов СЭМУД, выполненных по вариантам схем на рисунках 8–11, осложняется тем, что рабочие циклы таких машин еще мало изучены.

Реализация рабочих циклов СЭМУД с более низкой частотой ударных импульсов сил возможна только увеличением числа катушек. Однако с имеющимися сложностями в поддержании режима вынужденных колебаний механической системы машины с тремя и более катушками широкого практического применения не получили.

Получить точную оценку рациональности рабочих циклов по способу реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка только на основе анализа процессов энергопреобразования не представляется возможным. В этой связи возникает необходимость воспроизведения точных динамических моделей СЭМУД, наиболее полно отражающих взаимосвязи всех подсистем ударного узла и учитывающих возможности для проведения всестороннего анализа электромеханических процессов при учете нелинейностей в магнитной системе, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей в механической системе, сопровождаемых различного рода потерями энергии.

В третьей главе представлено решение задачи определения рабочих параметров ударного узла СЭМУД из условия допустимого нагрева в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины. На основе полученных приближенных решений для циклического нагрева разработаны методики теплового расчета с целью оптимизации работы СЭМУД, обусловленных заданным рабочим процессом в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле.

Приведена классификация и дана оценка конструктивного совершенства существующих систем охлаждения СЭМУД. Установлено, что среднее значение теплового потока, отнесенного к поверхности охлаждения катушки для систем с естественным воздушным охлаждением, находится в диапазоне значений $(5,2...13,3) \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, в то время как для систем с принудительным воздушным охлаждением этот показатель значительно выше и составляет $(9,7...22,2) \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$. Для поддержания режима работы с $PВ = 100\%$ увеличение мощности СЭМУД на каждые 4...6 Вт должно сопровождаться увеличением мощности вентиляционной установки приблизительно до 1,0 Вт.

Разработка новых виброударных технологий и применение для этих целей ЛЭМД вызывает необходимость совершенствования инженерных методик теплового расчета, позволяющих уже на стадии проектирования оптимизировать работу СЭМУД.

При допущении, что электромагнитная машина является однородным телом с равномерно распределенным источником тепла и с идеальной теплопроводностью, методом дискретных преобразований получено приближенное решение для циклического нагрева в переходном тепловом процессе с учтенным начальным превышением температуры по отношению к температуре окружающей среды

$$\tau(n)_{\min} = \tau(0)\gamma^n + \frac{\tau_y(1-a)(1-\gamma^n)\frac{\gamma}{a}}{1-\gamma}, \quad (1)$$

$$\tau(n)_{\max} = \tau(0)\gamma^n + \frac{\tau_y(1-a)(1-\gamma^n)}{1-\gamma}, \quad (2)$$

где $\gamma = e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_0}}$, $a = e^{-\frac{t_{\text{р}}}{T_0}}$, $\frac{\gamma}{a} = e^{-\frac{t_{\text{п}}}{T_0}}$, n – количество рабочих циклов на равноотстоящих интервалах времени; $\tau(n)_{\min}$, $\tau(n)_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значение перегрева в n -ом рабочем цикле; $\tau(0)$ – начальное превышение температуры по отношению к температуре окружающей среды.

Выражения (1) и (2) определяют минимальные и максимальные значения колебаний температуры на равноотстоящих интервалах времени для любого n -го цикла в переходном тепловом процессе нагрева. В качестве примера, иллюстрирующего влияние перегрева элементов ЛЭМД СЭМУД в переходных режимах по выражениям (1) и (2) на рисунке 12, a - z в относительных единицах приведены зависимости циклического нагрева при изменении состояний на дискретных равноотстоящих интервалах для следующих значений величин $\tau^* = \tau[n]_{\max}/\tau_y$, $T_0/t_{\text{ц}} = 15$, $t_{\text{ц}}/t_{\text{р}} = 4$.

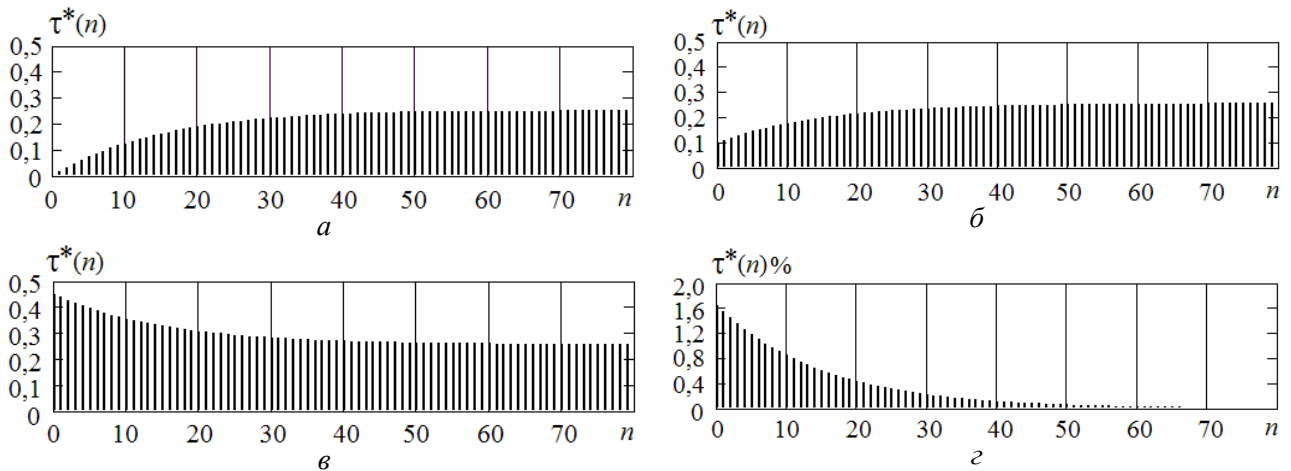


Рисунок 12 – Зависимости перегрева при изменении аргумента решетчатой функции в переходном процессе: a – при $\tau[0] = 0$; b – при $\tau[0] = 0,1\tau_y$; v – при $\tau[0] = 0,45\tau_y$; z – относительная разница температуры перегрева между циклами в переходном режиме

Для случая циклического нагрева в переходном тепловом процессе установлена связь между максимальным количеством произведенных рабочих циклов, продолжительностью работы, энергией и частотой ударов, а также теплофизическими и геометрическими параметрами в зависимости от начального перегрева

$$n_{\max} = \frac{T_0 n_{\text{уд}}}{60} \ln \left[(1 - k_P \beta)^{-1} (\varepsilon_\tau - k_P \beta) \right], \quad (3)$$

$$t_{\max} = T_0 \ln \left[(1 - k_P \beta)^{-1} (\varepsilon_\tau - k_P \beta) \right], \quad (4)$$

где $\beta = \frac{1-a}{1-\gamma}$; $\varepsilon_\tau = \frac{\tau[0]}{\tau[n]_{\max}}$ – характеризует относительное превышение температуры перегрева над температурой окружающей среды; k_P – коэффициент перегрузки по мощности.

Решение для коэффициента перегрузки по мощности

$$k_P = \frac{\tau_y}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{A_{\text{уд}} (1-\eta)}{t_p \eta k_T (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) S_{\text{п}}} \quad (5)$$

где $A_{\text{уд}}$ – энергия удара; η – КПД машины; k_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности; $\vartheta_{\text{доп}}$ – допустимая температура нагрева; ϑ_0 – температура окружающей среды; $S_{\text{п}}$ – поверхность охлаждения.

На рисунке 13, а и рисунке 13, б приведены зависимости $n_{\max} = f(k_P)$ и $n_{\max} = f(\varepsilon_\tau)$ по выражению (3), устанавливающие связи между максимальным количеством произведенных циклов для фиксированных значений k_P и ε_τ .

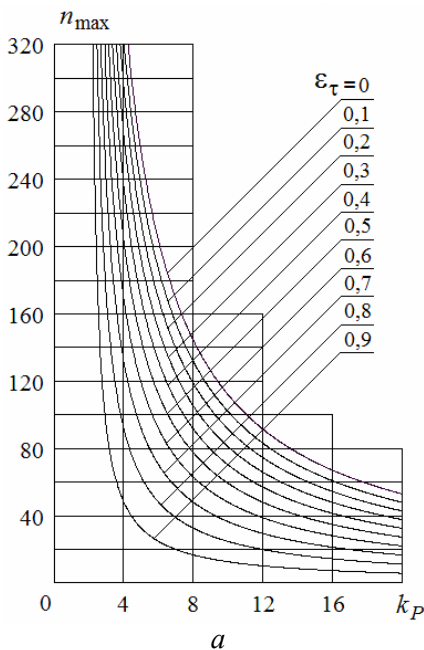


Рисунок 13 – Зависимости для n_{\max} при $T_0/t_{\text{ц}} = 500$,
 $t_p/t_{\text{ц}} = 0,5$: а – $n_{\max} = f(k_P)$; б – $n_{\max} = f(\varepsilon_\tau)$

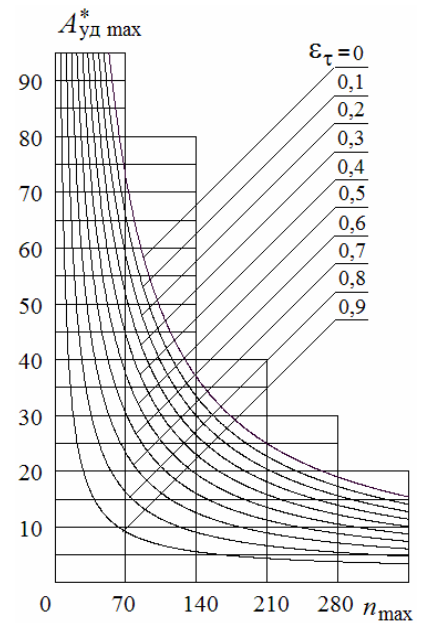
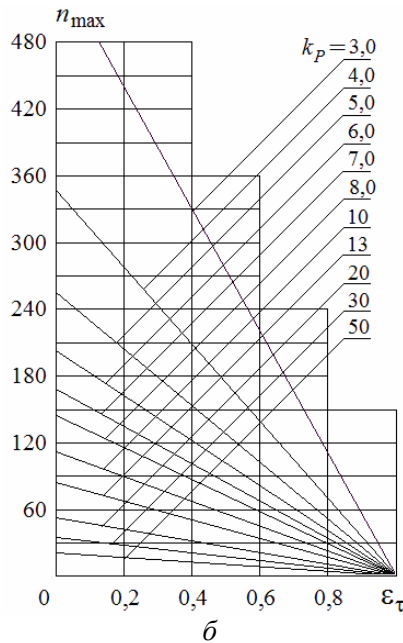


Рисунок 14 – Зависимости для $A_{\text{уд}}^*_{\max} = f(n_{\max})$ при
 $T_0/t_{\text{ц}} = 2500$ и $t_p/t_{\text{ц}} = 0,5$

С учётом колебаний температуры в цикле машины получены выражения для энергии удара, устанавливающие ее предельные значения в зависимости от количества произведенных рабочих циклов и учитывающие начальное превышение температуры на момент включения:

$$A_{\text{уд}} \Big|_{\min} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) S_{\text{п}}}{(1-\eta)} \cdot \frac{(1-\varepsilon_\tau \gamma^n)(1-\gamma)}{(1-a)(1-\gamma^n)} \cdot \frac{a}{\gamma}, \quad (6)$$

$$A_{уд}|_{max} = \frac{t_p \eta k_T (\vartheta_{доп} - \vartheta_0) S_{II}}{(1-\eta)} \cdot \frac{(1-\varepsilon_\tau \gamma^n)(1-\gamma)}{(1-a)(1-\gamma^n)}. \quad (7)$$

Ограничиваясь значениями максимального перегрева и устраняя факт объема машины, на рисунке 14 приведены относительные зависимости $A_{уд max}^* = f(n_{max})$ по выражению (7). Зависимости (рисунок 14) отражают регулировочные характеристики ЛЭМД, обеспечивающие оптимальное управление тепловой нагрузкой СЭМУД с учетом начального превышения температуры в рабочем цикле машины.

Учитывая разницу колебания температуры в рабочем цикле, также дана оценка перегрузочной способности СЭМУД по средней температуре перегрева и установлена связь между его выходными показателями при нулевых начальных условиях.

Для широко распространенного в практике повторно-кратковременного режима получены приближенные решения, учитывающие различные условия охлаждения катушек в периоды работы и бестоковой паузы. В качестве примера на рисунке 15 представлены относительные зависимости

$$\frac{k_P}{k_P^I} = f\left(\frac{T_0^{II}}{T_0^I}\right)$$

для предпочтительных значений ПВ%, где k_P, k_P^I – коэффициенты тепловой перегрузки по мощности, характеризующие разные условия охлаждения в периоды работы и в периоды бестоковой паузы в режиме ПВ%; T_0^{II}, T_0^I – постоянные времени нагрева в период работы и в период бестоковой паузы при разных условиях охлаждения.

Разработаны методики теплового расчета СЭМУД от параметров, характеризующих циклический режим работы, которые могут быть широко использованы в практике проектирования для решения вопросов управления тепловой нагрузкой. Это позволяет без применения сложного математического аппарата оптимизировать работу циклической машины с учетом заданных параметров, обусловленных рабочим процессом.

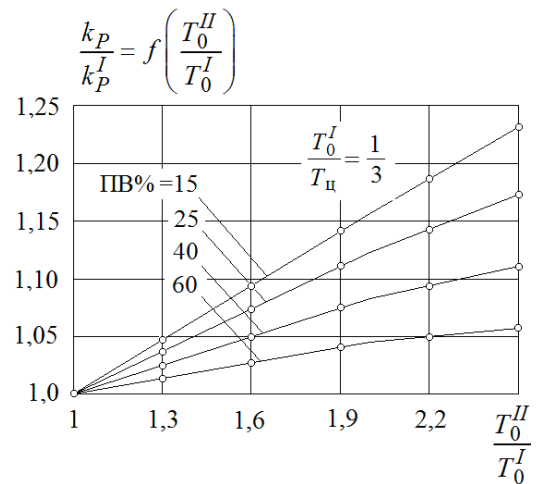


Рисунок 15 – Зависимости

$$\frac{k_P}{k_P^I} = f\left(\frac{T_0^{II}}{T_0^I}\right) \text{ для различных ПВ\%}$$

В четвертой главе дана комплексная оценка силам сопротивления, противодействующим ускорению бойка, и потерям энергии в механической системе при передаче кинетической энергии посредством ударных взаимодействий. Разработаны варианты моделей обобщенной магнитной цепи с массивным магнитопроводом, обеспечивающие расчет потерь мощности от вихревых токов в различных режимах в зависимости от степени насыщения ферромагнитных материалов и закона формирования напряжения на входе электромеханического преобразователя, а также получены рекомендации по повышению точности этого расчета. Рассмотрен учет нелинейных свойств моделей на основе предварительного численного расчета статических параметров потокоцепления и электромагнитного усилия с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

Для самого общего случая выработаны рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения и дана оценка этой силы и ее отдельных компонент по отношению к движущей электромагнитной силе в зависимости от имеющей место магнитной асимметрии, возникающей вследствие разности предельных отклонений размеров сопрягаемых элементов конструкции магнитопровода. Наличие данной силы увеличивает

ет потери, вызванные силами кулоновского трения в механической системе.

Типичным примером такого сопряжения является технологический зазор Δ между поступательно движущимся сердечником (бойком) радиуса r_1 и охватывающей его поверхностью неподвижного полюса радиуса r_2 на рисунке 16.

На рисунке 17 показаны зависимости отдельных компонент усилия одностороннего магнитного притяжения, возникающих вследствие неоднородности магнитного поля, сосредоточенного в объеме нерабочего зазора Δ полюсной системы $f_{\text{п}}^*$ и в объеме, занятом катушкой $f_{\text{р}}^*$, по отношению к движущему электромагнитному усилию, в заданном диапазоне изменения эксцентриситета ε_x (рисунок 16) при втянутом сердечнике.

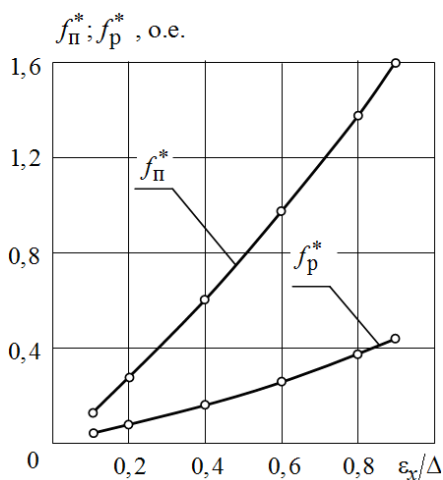


Рисунок 17 – Компоненты приведенного усилия одностороннего магнитного притяжения

(рисунок 16). Для повышения точности расчета данной силы рекомендуется воспользоваться одним из установленных в работе выражений

$$F_{\varepsilon_x} = \frac{\pi B_{\varepsilon_x}^2 r_1 \varepsilon_x h_{\text{п}}}{\mu_0 r_2 \sqrt{(a - b \varepsilon_x^2)^2 - 1}}, \quad \text{где } a = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2 r_1 r_2}; \quad b = \frac{1}{2 r_1 r_2}. \quad (8)$$

Показано, что точность при динамических расчетах в существенной степени зависит от точности воспроизведения математических аналогов механических характеристик. В особенности это касается учета процессов, связанных с рассеянием энергии, как за счет собственных демпфирующих свойств (вязкого трения) упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого (кулоновского) трения в механической системе.

Следующим важным моментом при моделировании ударных систем является решение вопросов взаимодействия импульсов сил при частично упругом ударе, что сопровождается дополнительными потерями кинетической энергии.

Разделяя процесс при прямом центральном ударе двух тел на две стадии в момент и после удара, учитывая упругие и диссипативные свойства материала, а также полагая, что в процессе удара изменяются физические свойства массы тел, вызванные деформацией и неполным восстановлением их объемов, изучено влияние параметров ударной системы

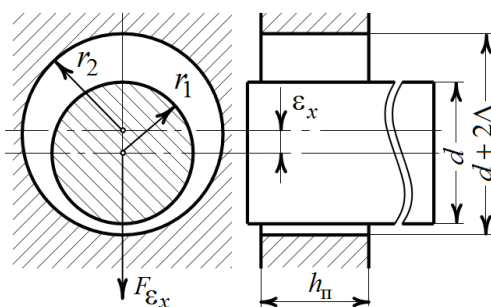


Рисунок 16 – Расчетная область нерабочего зазора

Установлено, что в зависимости от начальной глубины внедрения сердечника бойка в катушку сила одностороннего магнитного притяжения может быть сопоставима или превышать максимальное значение движущей электромагнитной силы.

Показано, что учет только одной компоненты усилия одностороннего магнитного притяжения сердечника бойка, ограниченной только областью нерабочего зазора, может оказаться недостаточным и обладать недопустимо большой погрешностью вычислений, а также неизбежными ошибками при составлении точной динамической модели СЭМУД.

Выполнена модернизация распространенной в практике формулы А.В. Гордона для определения силы одностороннего магнитного притяжения, полученной на основании решения для магнитной проводимости свободного от объема пространства, занятого системой для двух некоаксиальных ферромагнитных цилиндров

«боёк – рабочий инструмент» на эффективность процесса преобразования кинетической энергии бойка при работе СЭМУД. В частности получено выражение для коэффициента отскока бойка от рабочего инструмента, который зависит от параметров ударной системы

$$k_{от} = \frac{-\bar{v}_1}{v_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(k_B - \frac{m_1}{m_2} \right),$$

где v_1, \bar{v}_1 – скорости центра масс бойка в начале и по окончании удара; m_1 – масса бойка; m_2 – масса рабочего инструмента; k_B – коэффициент восстановления скорости, зависящий от физических свойств материала ($k_B = 0 \dots 1,0$).

Получено выражение для кинетической энергии T_1 , возвращаемой в механическую систему при отскоке бойка, и кинетической энергии T_2 , переходящей рабочему инструменту:

$$T_1 = \frac{m_1 \bar{v}_1^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \left[\frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(k_B - \frac{m_1}{m_2} \right) \right]^2;$$

$$T_2 = \frac{m_2 \bar{v}_2^2}{2} = \frac{m_2 v_1^2}{2} \left[\frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + k_B) \right]^2.$$

Эффективность передачи энергии ударом с учетом потерь энергии на деформацию объемов тел

$$k_{эф} = \frac{T - T_1}{T} = 1 - \left[\frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(k_B - \frac{m_1}{m_2} \right) \right]^2,$$

где T – кинетическая энергия бойка на момент удара.

Влияние параметров ударной системы с потерями энергии на деформацию в виде зависимости $k_{эф} = f(m_1/m_2, k_B)$ рассмотрено на диаграмме, приведенной на рисунке 18. Аналогичные зависимости установлены при изучении влияния параметров ударной системы «боёк – инерционный преобразователь».

Для расчета потерь мощности от вихревых токов в стальных элементах магнитопровода рассмотрены варианты моделей по учету этих потерь в зависимости от насыщения ферромагнитного материала и закона формирования напряжения на входе, и представлена их схемная реализация методами структурного моделирования в Matlab Simulink демонстрирующая их высокую вычислительную устойчивость.

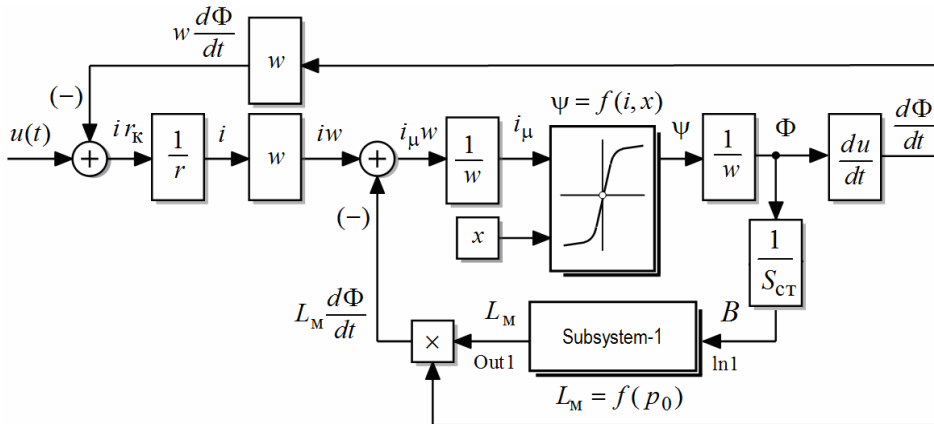


Рисунок 19 – Структурная схема модели магнитной цепи с потерями энергии в короткозамкнутом контуре

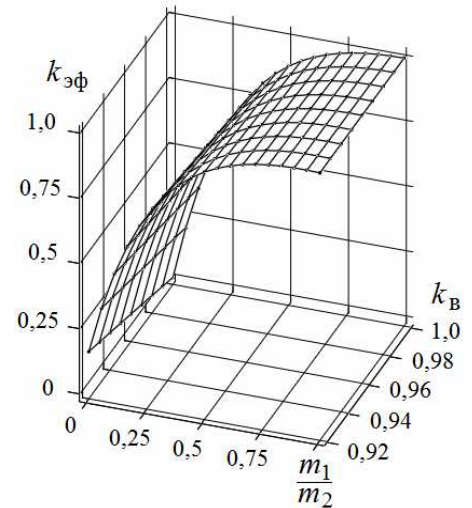


Рисунок 18 – Зависимости $k_{эф} = f(m_1/m_2, k_B)$

Вариант модели в виде структурной схемы, построенной на базе уравнений электрического и магнитного равновесия при допущении о возможности замены контуров вихревых токов короткозамкнутой обмоткой, представлен на рисунке 19. Учет потерь мощности в магнитопроводе вы-

полняется подсистемой «Subsystem-1». Входной величиной подсистемы является вектор индукции магнитного поля $B(t)$, выходной – магнитная индуктивность L_M , пропорциональная потерям. Нелинейность зависимости удельных потерь от степени насыщения магнитопровода учтена с помощью блока одномерной таблицы $p_0 = f(B_m)$.

На рисунке 20 приведён вариант структурной схемы модели, основанной на параллельной схеме замещения.

Учет потерь мощности в массивном магнитопроводе выполняется подсистемой «Subsystem-2», в качестве которой рассматривалось несколько вариантов моделей: по первому варианту модели расчет потерь мощности выполняется относительно основной гармонической составляющей магнитного потока, совпадающей по фазе с периодом напряжения на входе, получаемой разложением несинусоидальной функции $B(t)$ в ряд Фурье; во втором варианте учет потерь мощности от вихревых токов основан на разложении несинусоидальной функции $B(t)$ в ряд Фурье до третьей гармоники включительно, а результирующее значение магнитной индукции определяется в виде эквивалентной синусоиды; по третьему варианту модели действие магнитного потока $\Phi(t)$ предлагается рассматривать в виде эквивалентной синусоиды с действующим значением этого потока, равным действующему значению несинусоидальной функции $\Phi(t)$. В качестве примера на рисунке 21 и рисунке 22 приведены детализированные структурные схемы подсистемы по первому и второму варианту моделей.

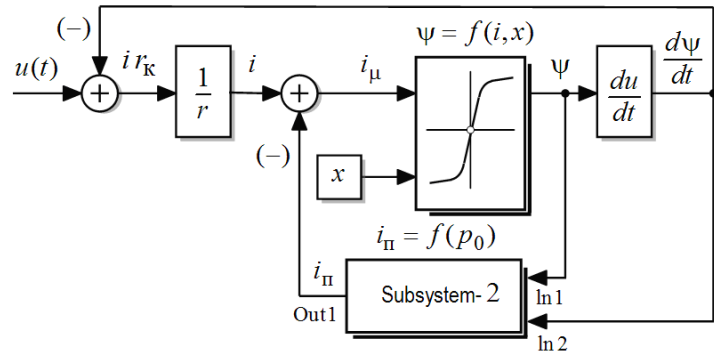


Рисунок 20 – Структурная схема модели магнитной цепи с потерями энергии в массивном магнитопроводе

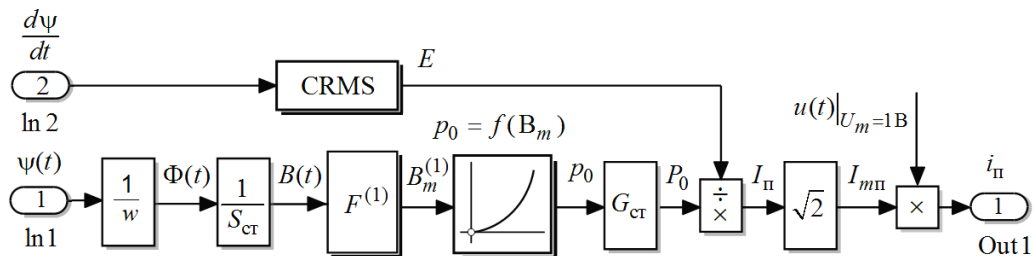


Рисунок 21 – Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem-2» (вариант-1)

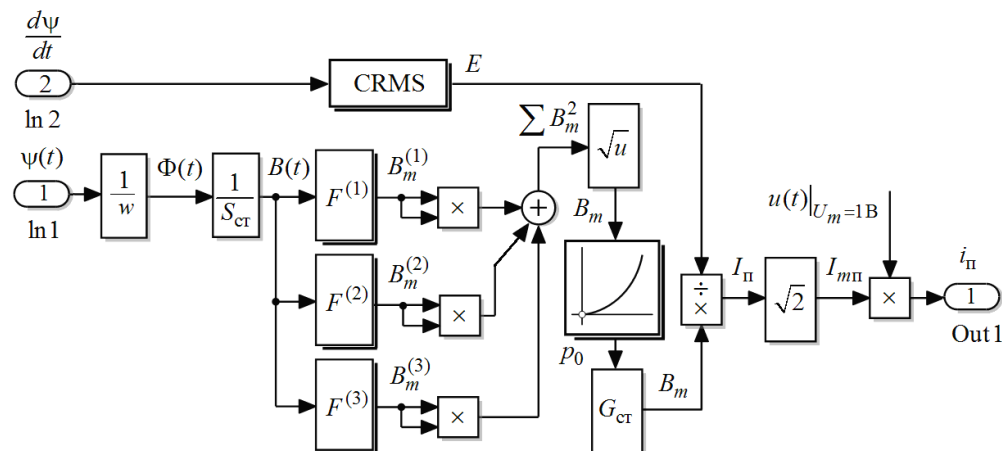


Рисунок 22 – Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem-2» (вариант-2)

При сравнении вариантов моделей использовались три различные по форме источника периодического сигнала с действующими значениями напряжения, равными синусоидальному источнику одинаковой частоты. Показано, что расхождения по результатам моделирования различных вариантов моделей не превышает 5%.

Для повышения точности воспроизведения нелинейных свойств динамических моделей СЭМУД и скорости расчета, в качестве исходных данных использовался массив статических параметров потокосцепления $\psi(i, x)$ и электромагнитного усилия $f_{эм}(i, x)$, полученный с помощью предварительного расчета магнитного поля. Задание функции двух аргументов и интерполяция расчетных значений статических параметров осуществлялась в Matlab Simulink с помощью блока двумерной таблицы Look-Up Table(2D). В качестве примера на рисунке 23 представлена расчетная область модели ЛЭМД и результат построения картины поля линий магнитного потока (рисунок 23, а) и массив значений расчетных статических параметров модели (рисунок 23, б, в) в виде трехмерного графика поверхности опорных точек.

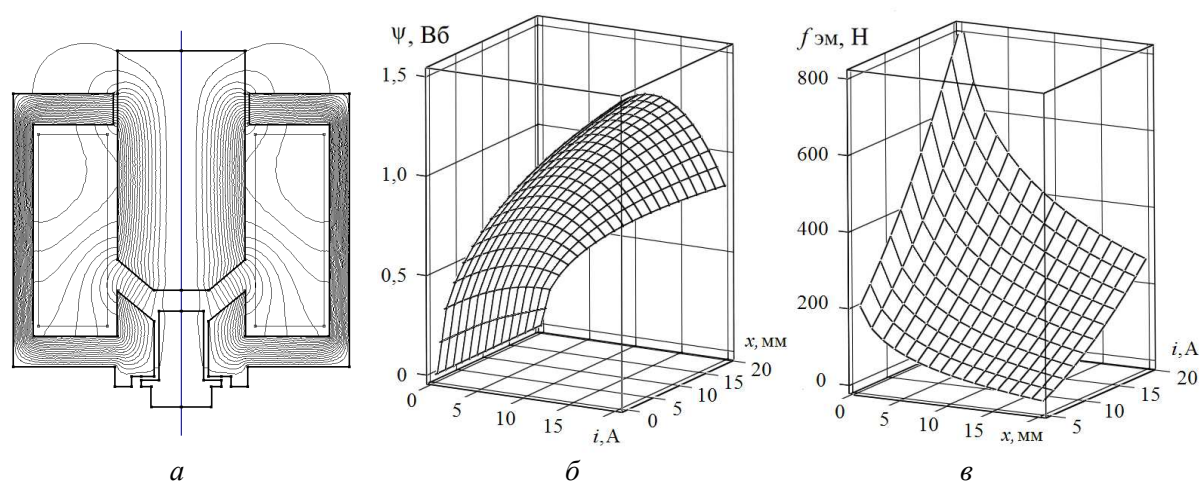


Рисунок 23 – Расчет статических параметров модели ЛЭМД: а – геометрия расчетной области модели; б – потокосцепление $\psi = f(i, x)$; электромагнитное усилие $f_{эм} = f(i, x)$.

Использование данного подхода позволило с высокой степенью точности учесть геометрию магнитной цепи, потоки рассеяния и нелинейность характеристик применяемых материалов. Эффективность данного метода подтверждается высокой точностью воспроизведения динамических характеристик вариантов СЭМУД.

В пятой главе разработаны математические модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД. Рассмотрены алгоритмы расчета и варианты схемной реализации компьютерных моделей методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Показано, что для учета колебательных взаимодействий в механической подсистеме наиболее рационально применять метод Лагранжа, а процесс движения следует рассматривать, как результат наложения вынужденных и свободных колебаний системы. Также приведены результаты анализа ЭМКС с ЛЭМД при возбуждении периодических ударных импульсов сил.

Основу математической модели ЭМКС составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы ЛЭМД и механическое взаимодействие поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнений Лагранжа второго рода.

В качестве объекта исследований рассматривалась обобщенная модель многомассовой ЭМКС с возвратно-поступательным движением взаимодействующих между собой инерционных масс, связанных упругими связями и возбуждаемых периодической электромагнитной силой катушки.

Примеры построения ЭМКС и их расчетные динамические схемы, ограниченные тремя степенями свободы ($N = 3$), представлены на рисунке 24 и содержат электромагнитную катушку 1, питаемую периодическим напряжением (током), неподвижный 2 и подвижный 3 сердечники с возможностью электромагнитного взаимодействия. На рисунке 24 используются обозначения $f_{эм}$ – вынуждающая электромагнитная сила; x_1 , x_2 и x_3 – обобщенные координаты линейного перемещения центра масс; m_1 – масса подвижного сердечника; m_2 – присоединенная масса; M – масса ЛЭМД, без учета массы подвижного сердечника; k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты жесткости упругих связей (пружин); b_1 , b_2 и b_3 – коэффициенты вязкого трения упругих связей; $f_{тр1}$, $f_{тр2}$ – силы сухого трения скольжения.

В целях упрощения структура ЛЭМД на рисунках представлена условно. Расчетной схеме на рисунке 24, в при $x_3 = 0$ будет соответствовать расчетная схема на рисунке 24, а, а при $x_1 = x_2$ – расчетная схема на рисунке 24, б.

При составлении уравнений движения механической системы целесообразно воспользоваться уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad (9)$$

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – диссипативная функция механической системы (функция Рэля); Q_i – обобщенная сила системы, соответствующая i -й обобщенной координате ($i = 1, 2, \dots, N$); x_i, \dot{x}_i – обобщенные координаты и скорости; N – число степеней свободы механической системы.

В выбранной системе координат положение устойчивого статического равновесия системы принимается за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии. Последовательно определяя и внося производные от кинетической, потенциальной энергии системы, функции Рэля в уравнение (9) с учетом внешних воздействий, согласно предварительно установленным связям, совместно с уравнением электрического равновесия получаем систему дифференциальных уравнений, которая характеризует динамическое состояние ЭМКС с ЛЭМД с учетом упругих связей и сил трения скольжения:

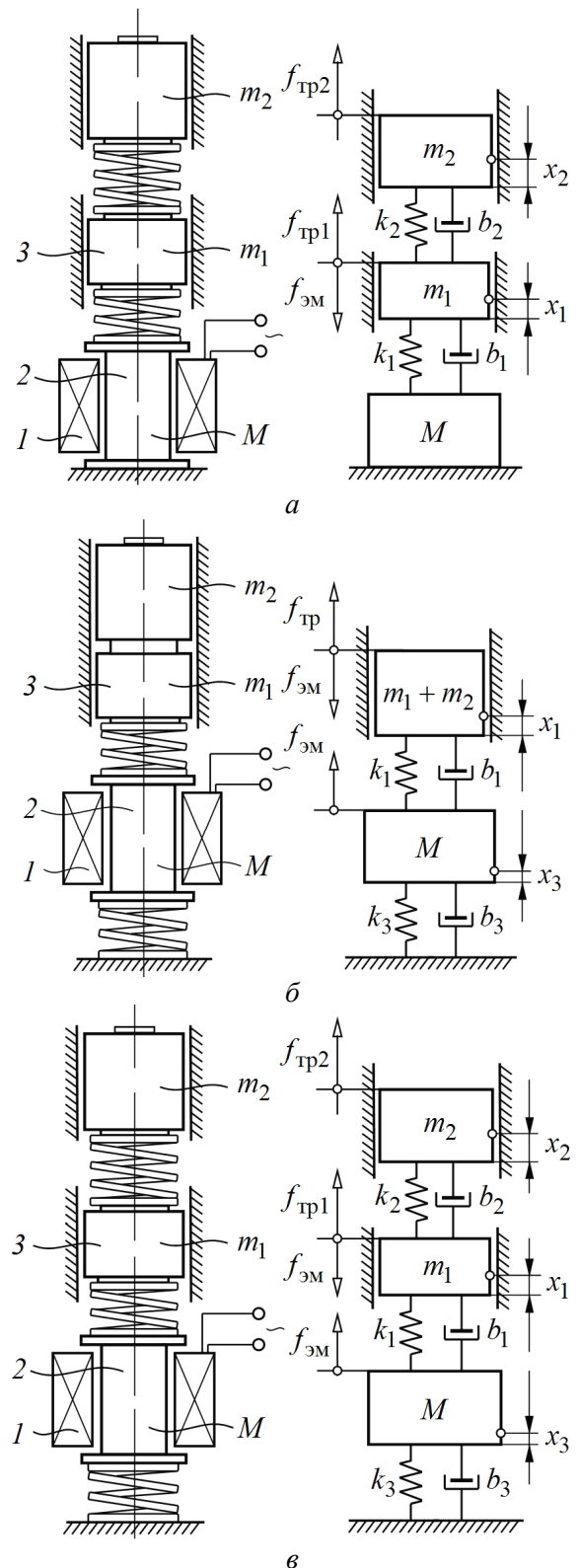


Рисунок 24 – ЭМКС с ЛЭМД и её расчетная схема: а – двухмассовая по первому варианту; б – двухмассовая по второму варианту; в – трехмассовая система

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = i r_k + \frac{d\psi}{dt}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) - k_2 (x_2 - x_1) = \\ = -f_{\text{тр1}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{эм}}(i, x); \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + k_2 (x_2 - x_1) = -f_{\text{тр2}} \text{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ M \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_3 \frac{dx_3}{dt} - k_1 (x_1 - x_3) + k_3 x_3 = -f_{\text{эм}}(i, x). \end{array} \right. \quad (10)$$

где $u(t)$ – напряжение периодического источника; i – ток катушки; ψ – потокосцепление; r_k – активное сопротивление катушки.

Модель (10) обеспечивает широкие возможности для анализа электромеханических процессов в различных режимах. Математическую модель ЭМКС на рисунке 24, а следует рассматривать, как частный случай системы (10) при $x_3 = 0$, а модель ЭМКС на рисунке 24, б, как частный случай при $x_1 = x_2$. Принимая для системы (10) $x_3 = 0$ и $x_1 = x_2$, возможен переход к варианту модели одномассовой колебательной системы с упругими связями, в которой уравнение движения принимает канонический вид

$$(m_1 + m_2) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 = -f_{\text{тр}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{\text{эм}}(i, x_1). \quad (11)$$

Частным решением (11) являются вынужденные колебания ЭМКС. Зависимость амплитуды колебаний, от частоты которых может быть представлена в виде амплитудно-частотной характеристик (АЧХ) $\tilde{a}_{1m} = f(\omega)$ (рисунок 25) для частоты собственных механических колебаний механической системы $\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1}$.

Для исследования электромеханических процессов разработаны алгоритмы расчета и варианты схемной реализации математических моделей методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. На первом этапе реализации моделей с помощью расчета магнитного поля определялись значения электромагнитного усилия $f_{\text{эм}} = f(i, x)$ и потокосцепления $\psi = f(i, x)$, которые затем представлялись в виде массива опорных точек (рисунок 23). На втором этапе полученные массивы значений статических параметров $f_{\text{эм}} = f(i, x)$ и

$\psi = f(i, x)$ использовались для расчета динамики. Пример структурной схемы магнитной подсистемы модели «Magnetic subsystem» представлен на рисунке 26. Для исследования особенностей работы ЭМКС созданы их компьютерные модели.

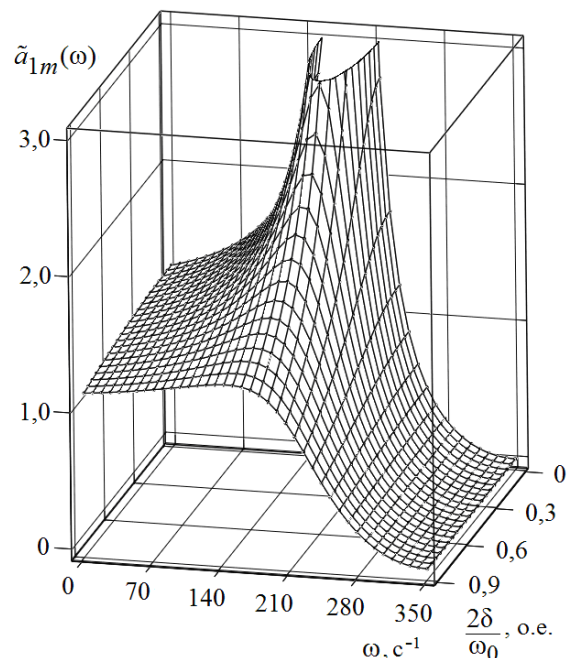


Рисунок 25 – АЧХ механической системы $\tilde{a}_{1m} = f(\omega)$

При проведении комплекса исследований использовалась система общепринятых показателей как активная и полная мощности системы, механическая мощность, мощность потерь в меди, механические потери мощности, вызванные трением скольжения и вязким трением в упругих связях, действующие значения напряжения и тока на входе, коэффициент мощности, КПД и т.д., реализованные с помощью измерительных модулей. На рисунке 27 приведены диаграммы изменения во времени тока $i(t)$, перемещения $x_1(t)$ и скорости $v_1(t)$ подвижного сердечника в режиме наброса нагрузки в виде присоединенной к подвижному сердечнику массы в момент времени $t = 0,4$ с для случая питания от периодического сигнала напряжения в форме положительных импульсов прямоугольной формы частотой следования 50 Гц.

Значительное влияние процессы рассеяния энергии в упругих связях оказывают на максимальные значения амплитуды и скорости колебаний (рисунок 28). Здесь важно указать, что точность при динамических расчетах в значительной степени зависит от правильности выбора коэффициента вязкости упругих связей и силы трения скольжения. В результате сравнения расхождения расчетных и экспериментальных характеристик моделей не превышают общепринятых для инженерной практики 5...8%.

На примере четырехмассовой ЭМКС с ЛЭМД с безынерционным упругим реверсом бойка показано, что процесс ударного взаимодействия в системе следует рассматривать как результат наложения вынужденных, свободных колебаний в механической системе и периодических ударных импульсов сил, определенным образом зависящих от параметров ударной системы. Рассмотрен алгоритм расчета и вариант схемной реализации динамической модели методами структурного моделирования, учитывающий потери в стали. Выполнена верификация компьютерной модели. Результаты моделирования оценивались сравнением расчетных значений интегральных показателей с данными физического эксперимента однокатушечного СЭМУД, питаемого по однополупериодной схеме выпрямления, которые представлены на рисунке 29.

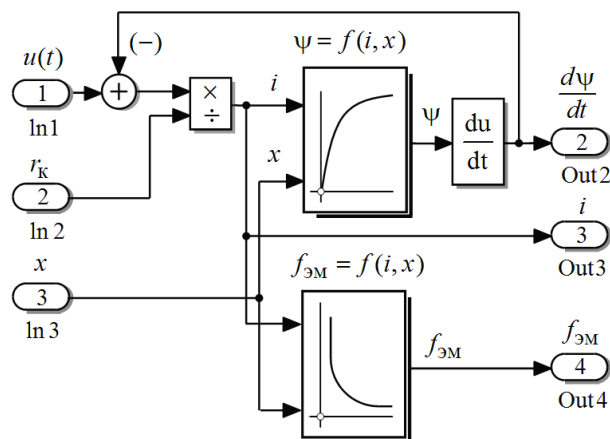


Рисунок 26 – Структурная схема магнитной подсистемы ЭМКС «Magnetic subsystem»

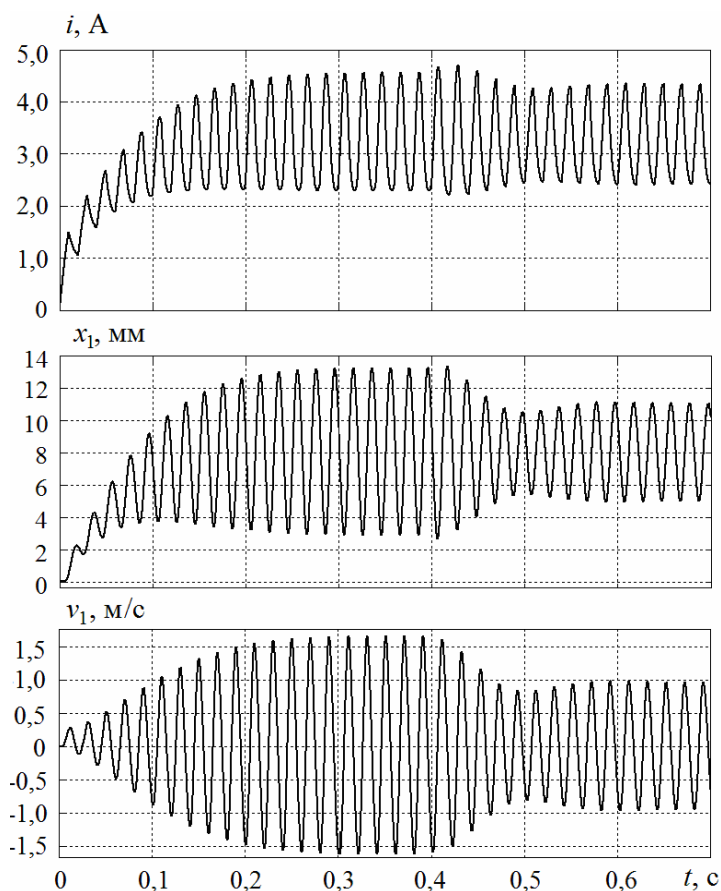


Рисунок 27 – Временные диаграммы переходного процесса ЭМКС без учета ударного взаимодействия

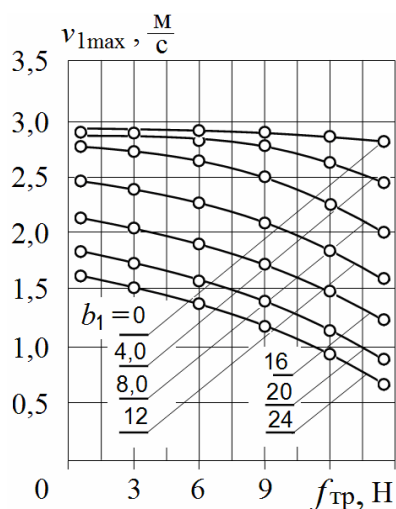


Рисунок 28 – Влияние демпфирующих свойств упругих связей и сил трения скольжения

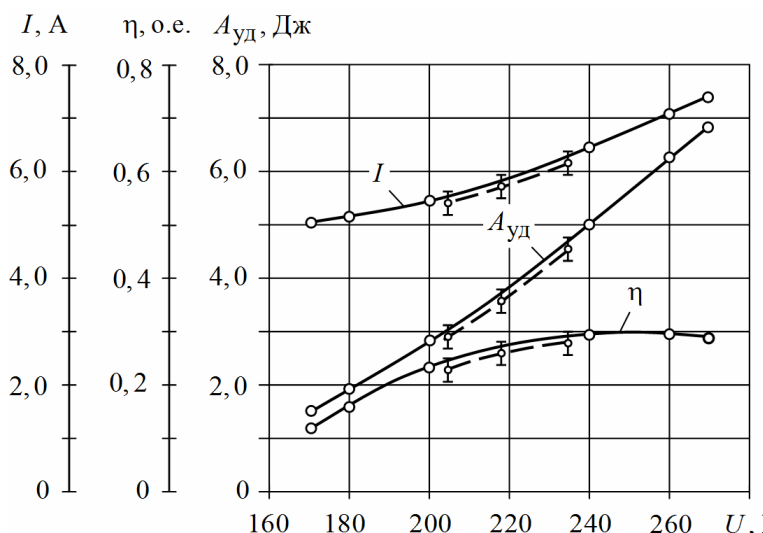


Рисунок 29 – Рабочие характеристики ударного узла с ЛЭМД: сплошные кривые – расчетные; штриховые – экспериментальные

Из анализа рабочих характеристик получено, что максимальная погрешность при расчетах не превышает 6%. Это лежит в пределах погрешности обработки экспериментальных данных.

В шестой главе рассмотрен единый методологический подход к математическому описанию вариантов схем СЭМУД, учитывающий ударные взаимодействия в механической системе и различного рода потери энергии электрической, магнитной и механической природы. Рассмотрены алгоритмы расчета и представлены компьютерные модели, полученные методами структурного моделирования в Matlab Simulink, отличающиеся способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. Созданы обобщенные модели. Приведены результаты анализа рабочих процессов и рассмотрены перспективные направления развития СЭМУД и устройств на их основе.

На основе созданных математических моделей различных по конструкции СЭМУД, представляющих собой дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы и механические взаимодействия поступательно движущихся масс показано, что для описания электромеханических процессов все модели имеют единую методологическую основу.

Важным этапом при создании моделей являются принятия решения по расчетной динамической схеме ЭМКС, входящей в состав СЭМУД, как правило, представляющей сложную и связанную динамическую систему с большим числом входных переменных. Следует понимать, что упрощение связей в этой системе, работающей исключительно в переходных квазиустановившихся режимах, ограничивает возможности модели и может негативно отразиться на результатах исследований.

Считается, что механическая и магнитная подсистемы ударного узла СЭМУД связаны зависимостью электромагнитного усилия $f_{эм} = f(i, x)$, а связь магнитной и электрической подсистемы – зависимостью величины потокосцепления $\psi = f(i, x)$, причем с увеличением количества катушек число этих связей кратно возрастает. Для воспроизведения нелинейных свойств магнитной подсистемы используем исходные данные в виде набора статических параметров $\psi(i, x)$ и $f_{эм}(i, x)$, получаемых в результате решения полевой задачи для ЛЭМД с вполне определенной конфигурацией магнитной цепи, которые затем используются в модели в виде массива опорных точек.

Для описания движения ЭМКС используем вариационные принципы на основе уравнений Лагранжа второго рода (9). За начало отсчета обобщенных координат x_i и за

нулевой уровень потенциальной энергии принимаем положение статического равновесия механической системы. Также принимаем, что количество обобщенных независимых координат определяет число степеней свободы механической системы. Полагаем, что статические коэффициенты жесткости и коэффициенты сопротивления, характеризующие диссипативные свойства упругих связей, являются линейными, а сопротивление деформируемой среды при ударе зависит от жесткости и демпфирующих свойств введенных упругих связей. Эффективность процесса передачи энергии в эту среду определяется только параметрами ударной системы с потерями кинетической энергии на деформацию и неполное восстановление объемов частично упругих тел.

Окончательно процесс движения рассматриваем, как результат наложения вынужденных, свободных колебаний механической системы и периодических ударных импульсов сил.

Основные этапы реализации модели на примере двухкатушечной СЭМУД с инерционным реверсом бойка представлены на рисунках 30–32.

Для реализации рабочих циклов в ударном узле СЭМУД (рисунок 30) используется система из двух катушек прямого 1 и обратного 2 хода, заключенных в съемные статоры 3, 4, которые получают питание от однофазного источника по однополупериодной схеме выпрямления. Совершая возвратно-поступательные движения, боек 5 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 6 и инерционным преобразователем 7, находящимся в связи с упругим звеном 8, и передает энергию в деформируемую среду 9. Для снижения амплитуды вибрации используются промежуточное звено 11 и инерционная масса 10.

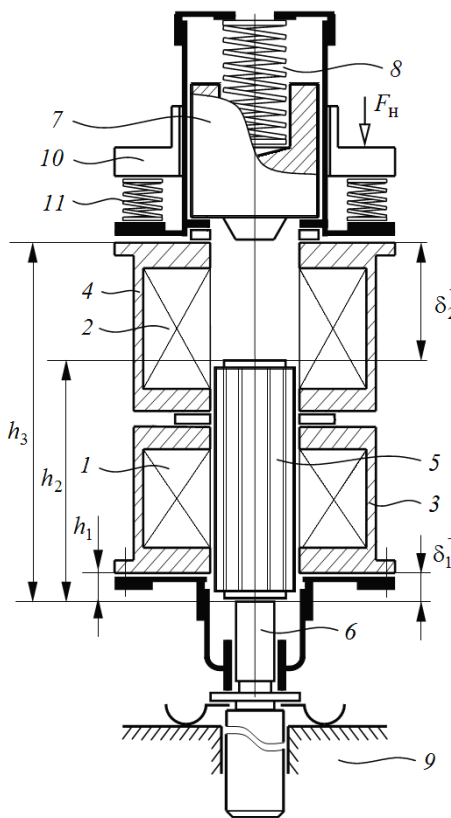


Рисунок 30 – Двухкатушечная СЭМУД с инерционным реверсом бойка

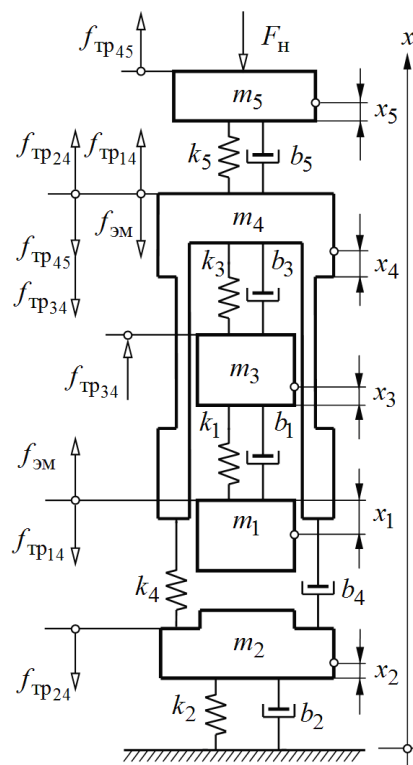


Рисунок 31 – Расчетная динамическая схема ЭМКС

Согласно установленным связям и действующим в системе обобщенным силам на рисунке 31 представлена расчетная динамическая схема ЭМКС ударного узла, имеющего $N = 5$ степеней свободы. В качестве обобщенных координат здесь выступают перемещения $x_1 \dots x_5$ центров масс $m_1 \dots m_5$. Для описания движения ЭМКС воспользуемся вариационными принципами на основе уравнений Лагранжа второго рода, а окончательный процесс движения рассмотрим, как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил.

Для каждой из двух катушек рассчитывается массив значений статических параметров $\psi(i, x)$ и $f_{эм}(i, x)$ с помощью расчета магнитного поля.

С учетом введенных ограничений и имеющих место потерь энергии математическая модель динамики СЭМУД (рисунок 30) может быть представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu_1}, x_1)}{dt}; \\
u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu_2}, x_1)}{dt}; \\
i_1 = i_{\pi_1} + i_{\mu_1}; \quad i_2 = i_{\pi_2} + i_{\mu_2}; \\
m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} N_3 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu_1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_{\mu_2}, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } t_{\text{ц}}(n-1) \leq t < (n-1)t_{\text{ц}} + t_{\text{р}}; \\ -N_1 - f_{\text{эм}1}(i_{\mu_1}, x_1) + f_{\text{эм}2}(i_2, x_1) - f_{\text{тр}14} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} \leq 0, \text{ при } (n-1)t_{\text{ц}} + t_{\text{р}} \leq t < nt_{\text{ц}}; \end{cases} \\
m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -N_4 - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{тр}24} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\
m_3 \frac{d^2 x_3}{dt} = N_2 + \tilde{\lambda}_3 + f_{\text{тр}34} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \\
m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_3 - \tilde{\lambda}_4 + \tilde{\lambda}_5 + f_{\text{эм}1}(i_{\mu_1}, x_1) - f_{\text{эм}2}(i_{\mu_2}, x_2) + \\
+ (f_{\text{тр}14} + f_{\text{тр}24} - f_{\text{тр}34} + f_{\text{тр}45}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \\
m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_5 + f_{\text{тр}45} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_{\text{н}},
\end{array} \right. \quad (12)$$

где $\tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2$; $\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_3 (x_4 - x_3)$; $\tilde{\lambda}_4 = b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_2)$; $\tilde{\lambda}_5 = b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4)$; $N_1 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}}$, $N_2 = \frac{m_3 \bar{v}_3}{\tau_{\text{и}}}$ – средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и инерционного преобразователя в конце упругого удара; v_1 , v_3 – скорости центра масс бойка и инерционного преобразователя в конце упругого удара; $N_3 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}}$, $N_4 = \frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{\text{и}}}$ – средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и ударного инструмента в конце упругого удара; \bar{v}_1 , \bar{v}_2 – проекции скоростей центра масс бойка и рабочего инструмента в конце упругого удара; $n = 1, 2, \dots$ – число полных циклов; $t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + t_{\text{п}}$ – длительность времени обратного и прямого хода бойка.

Базовый для двухкатушечной модели вариант структурной схемы (компьютерная модель), реализованный в соответствии с уравнениями (12) в программе Matlab Simulink, представлен на рисунке 32. Ввод исходных данных модели выполняется с помощью М-файлов. Задание функции двух аргументов и интерполяция статических параметров вы-

полняется с помощью четырех встроенных блоков двумерных таблиц, входящих в подсистему «Magnetic subsystem», в блоке также производится расчет потерь мощности от вихревых токов. Для построения двумерных таблиц используется массив значений (15x17), содержащий по 255 опорных точек. Расчет составляющей силы трения бойка, обусловленной силами одностороннего магнитного притяжения, выполняется с помощью подсистемы «Magnetic attraction».

При анализе рабочих процессов модели относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 4...6%.

Временные диаграммы рабочего процесса за полный рабочий цикл представлены на рисунке 33. Оценка адекватности математической модели производилась путем сравнения расчетных значений показателей энергии удара – $A_{уд}$, действующего значения тока – I , потребляемой – P_1 и полезной – P_2 мощности, КПД и $\cos \phi$ с показателями, полученными на физической модели (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение результатов моделирования

Значения показателя	$A_{уд}$, Дж	U , В	I , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	КПД, %	$\cos \phi$
Расчет	4,9	230	5,2	645	245	38	0,54
Эксперимент	4,8	230	5,4	670	240	36	0,54

Аналогичные модели созданы для одно- и двухкатушечных СЭМУД с иными способами реализации движения бойка и рассмотрены их компьютерные модели. Подтверждена эффективность использования новых рабочих циклов СЭМУД, обес-

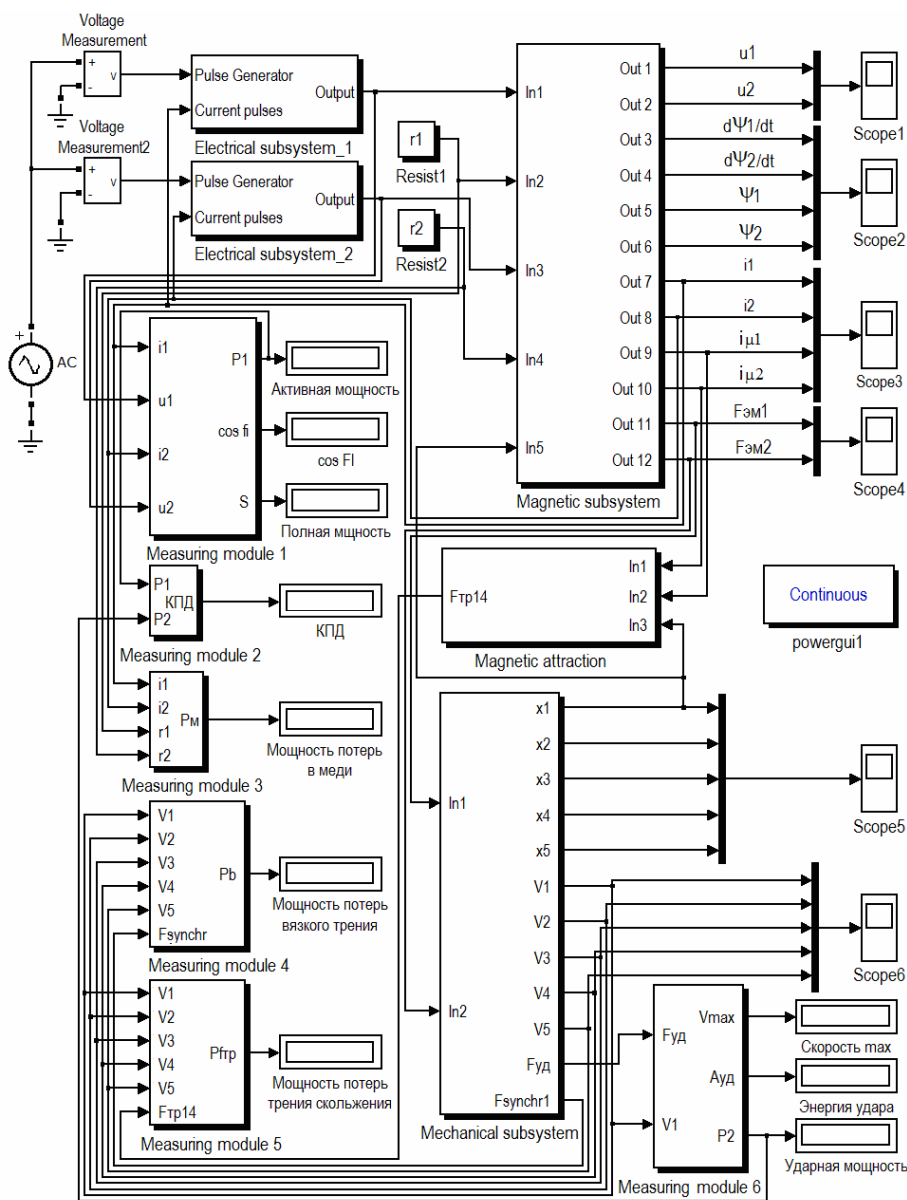


Рисунок 32 – Компьютерная модель СЭМУД в виде структурной схемы в Matlab Simulink

печивающих улучшение электромагнитной совместимости при питании от однофазного промышленного источника электроэнергии.

Рассмотрено современное состояние и перспективные направления развития СЭМУД и устройств, созданных на их основе. В работе приведены созданные при участии автора модели устройств на основе одно- и двухкатушечных СЭМУД различного технологического назначения с частотой удара до 50 с^{-1} и энергией удара до 6 Дж.

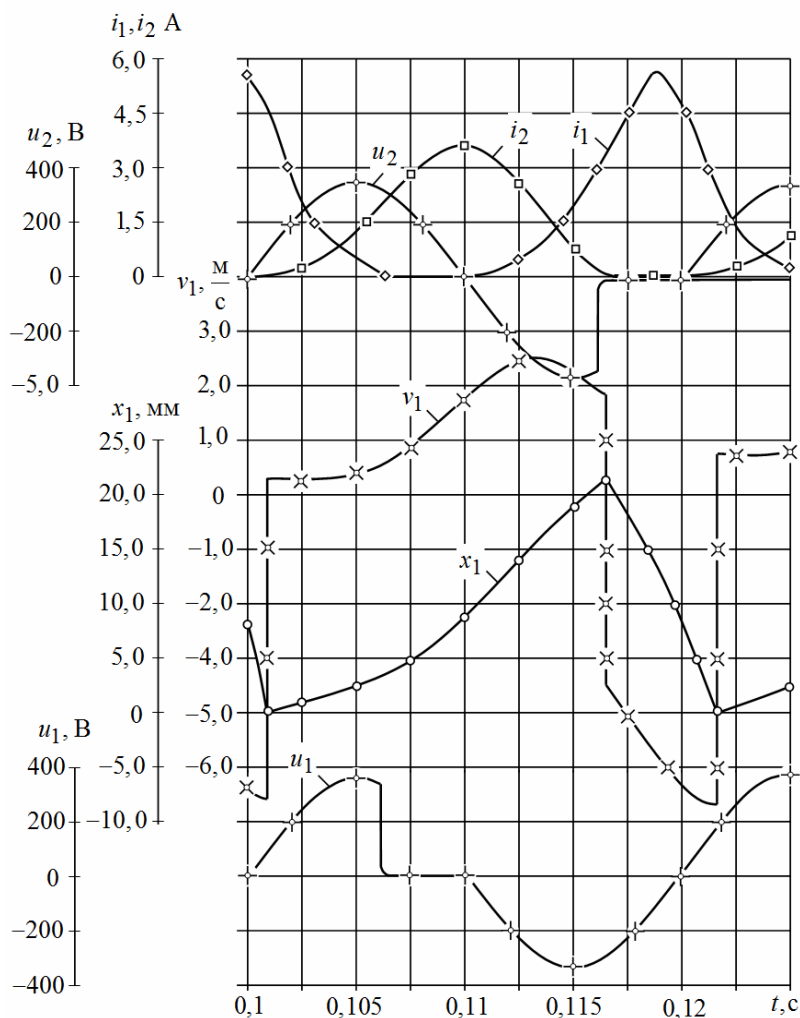


Рисунок 33 – Рабочий цикл двухкатушечной СЭМУД с инерционным реверсом бойка



Рисунок 34 – Модернизированная двухкатушечная СЭМУД

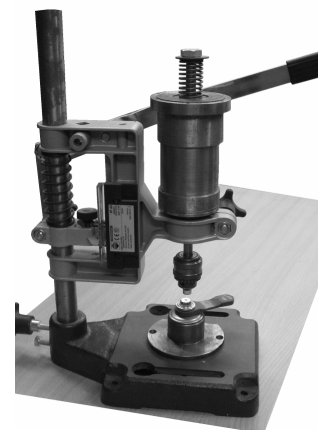


Рисунок 35 – Однокатушечная СЭМУД

На рисунке 34 и рисунке 35 представлены образцы моделей СЭМУД созданные в рамках реализуемой в различные годы программы стратегического развития НГТУ (2012-2017 г.), по приоритетным направлениям развития науки, проект «Энергоэффективность и энергосберегающие технологии». На рисунке 34 представлен модернизированный двухкатушечный вариант ударного узла ИЭ-4207 (Пат. РФ № 2496214; Пат. РФ № 2496215) с энергией удара 6 Дж. На рисунке 35 вариант однокатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка с энергией удара 3 Дж.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлены результаты решения комплексной научно-технической проблемы создания и совершенствования низкочастотных синхронных электромагнитных машин ударного действия, развитие общей теории ма-

шин, методов анализа и синтеза, направленные на повышение эффективности процесса электромеханического преобразования энергии в производственных технологических процессах посредством ударного взаимодействия с деформируемой средой. Решение данной проблемы основано на следующих основных результатах.

1. На основе выполненного структурного анализа рассмотрена тенденция преимущественного применения вариантов конструктивных схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, построенные преимущественно по одно- и двухкатушечным вариантам схем. Определены основные направления их развития и совершенствования, обеспечивающие наибольшую эффективность процесса электромеханического преобразования энергии при передаче кинетической энергии бойка в деформируемую среду посредством ударного взаимодействия с частотой, равной или кратной частоте промышленного однофазного источника электроэнергии 50 Гц.

2. Развита принципы построения вариантов конструктивных схем СЭМУД. На уровне изобретения обоснованы новые рабочие циклы и реализованы на их основе новые способы управления, позволяющие в разной степени ограничить амплитуду тока и негативное влияние на питающую сеть. Разработан комплекс мер и новых технических решений, использование которых позволяет повысить надежность, производительность, энергию удара и КПД.

3. На основе расчёта магнитного поля разработана методика сравнения цилиндрических ЛЭМД одинакового объёма и веса активных материалов, имеющих различные профили исполнения магнитной цепи, которая наиболее точно отражает современные тенденции преимущественного выбора вариантов схем по широкой группе показателей, применяемых в задачах проектирования.

4. Установлено, что выбор рационального варианта ЛЭМД для привода СЭМУД целесообразно вести по широко распространенным в практике значениям показателя «конструктивный фактор», используя установленные связи между условиями максимального выигрыша в расходовании активных материалов и конфигурацией исполнения магнитной цепи, что упрощает решение задачи многовариантного поиска при оптимизационных расчетах.

5. Для расширения границ и возможностей известного метода определения пределов рационального выбора ЛЭМД по значениям показателя «конструктивный фактор» и повышения качества этого выбора в задачах проектирования установлена целесообразность использования данных для расчета значений показателя из анализа зависимостей тяговых характеристик, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля. На примере расчета магнитного поля цилиндрического ЛЭМД, дана количественная оценка степени влияния определяющих величин на значения показателя «конструктивный фактор» и показателя экономичности в отношении расходования активных материалов, что свидетельствует об имеющейся возможности повышения точности данного метода и расширения разновидностей сравниваемых ЛЭМД, ограниченных в настоящее время типовыми конструкциями.

6. На основании установленных принципов построения вариантов конструктивных схем СЭМУД выполнен анализ процессов энергопреобразования, поясняющий закономерности протекающих процессов взаимного преобразования электрической, магнитной, кинетической, потенциальной энергии, что в сочетании с физической наглядностью процессов электромеханического преобразования энергии дополняет базовые знания фундаментальных положений теории импульсных электромагнитных машин и составляет научные основы их создания и совершенствования.

7. Методом дискретных преобразований получено приближенное решение для циклического нагрева СЭМУД в переходном тепловом процессе с учтенным начальным превышением температуры по отношению к температуре окружающей среды. Из условия допустимого нагрева получены приближенные расчетные выражения и разра-

ботаны на их основе методики расчета, устанавливающие связи между энергией и частотой ударов, допустимым количеством произведенных рабочих циклов при заданной частоте и энергии удара, теплофизическими свойствами и геометрическими размерами СЭМУД, что наиболее просто обеспечивает решение вопросов управления их тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины для длительного, кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы.

8. Для повышения точности воспроизведения механических аналогов динамических моделей дана комплексная оценка силам сопротивления, противодействующим ускорению бойка, и потерям энергии в механической системе, в частности:

– выработаны рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения бойка и дана оценка этой силы и её отдельных компонент по отношению к движущей силе в зависимости от магнитной асимметрии, возникающей вследствие разности предельных отклонений размеров сопрягаемых элементов конструкции магнитопровода;

– выполнена модернизация известного выражения по определению силы одностороннего магнитного притяжения, что позволяет повысить точность расчета этой силы относительно установленных ограничений по эксцентриситету;

– получены аналитические зависимости, отражающие влияние параметров ударной системы с потерями энергии на деформацию и неполное восстановление объемов соударяющихся тел при энергообмене ударом и передаче кинетической энергии бойка в деформируемую среду.

9. Разработаны варианты моделей обобщенной магнитной цепи ЛЭМД и алгоритмы для их расчета, позволяющие в переходных квазиустановившихся режимах производить расчёт потерь мощности от вихревых токов в зависимости от степени насыщения ферромагнитных участков и закона формирования напряжения на входе, обеспечивая их высокую вычислительную устойчивость при реализации методами структурного моделирования

10. Разработаны математические и компьютерные модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД, обеспечивающие широкие возможности анализа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах при возбуждении вынужденных периодических колебаний механической системы до 100 с^{-1} и сопровождаемые различного рода потерями энергии. Особенностью моделей является возможность учета свойств нелинейных магнитных материалов, потоков рассеяния, степени подвижности инерционных масс, свойств упругих связей, внешних воздействий, с большим набором входных и выходных переменных. Рассмотрен алгоритм расчета и варианты схемной реализации компьютерных моделей, представлены возможности динамического расчета рабочих процессов методами и средствами структурного моделирования в среде Matlab Simulink.

11. Разработан единый методологический подход к математическому описанию вариантов конструктивных схем СЭМУД, отличающихся способами реализации возвратно-поступательного движения бойка, и созданию их компьютерных моделей, наиболее полно и точно отражающие динамическое состояние электромеханической системы с различного рода потерями энергии при возбуждении периодических ударных импульсов сил и обеспечивающие широкие возможности в решении задач анализа и синтеза методами структурного моделирования с большим набором выходных переменных. Созданы обобщенные математические модели, включающие в себя широкий круг конструктивных исполнений базовых вариантов многомассовых однокатушечных и двухкатушечных СЭМУД. Подтверждена эффективность в использовании новых рабочих циклов СЭМУД, обеспечивающих улучшение электромагнитной совместимости при питании от промышленной сети.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Нейман, В.Ю. К вопросу учёта главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // *Электротехника*. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
2. Нейман, В.Ю. О допускаемой погрешности при сравнении подобных электромагнитов по значениям конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2011. – № 12. – С. 36–37.
3. Нейман, Л.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
4. Нейман, В.Ю. Сравнение геометрически подобных систем электромагнитов по условию постоянства теплового критерия / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // *Электротехника*. – 2011. – № 12. – С. 14а–16.
5. Нейман, Л.А. К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2012. – № 6. – С. 62–64.
6. Нейман, Л. А. Анализ процесса нагрева электромагнитного двигателя работающего в импульсном режиме / Л.А. Нейман, А.А. Скотников // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2012. – № 2. – С. 319–322.
7. Нейман, Л.А. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах / Л.А. Нейман, А.А. Скотников, В.Ю. Нейман // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
8. Нейман, Л.А. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка / Л.А. Нейман // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
9. Нейман, Л.А. Оценка перегрузочной способности ударного электромагнитного привода по средней температуре перегрева в переходных режимах / Л.А. Нейман // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2013. – № 6. – С. 58–61.
10. Нейман, Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 4 – С. 112–116.
11. Нейман, Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия / Л.А. Нейман // *Научный вестник НГТУ*. – 2013. – № 4. – С. 177–183.
12. Нейман, Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента / Л.А. Нейман // *Научный вестник НГТУ*. – 2013. – № 4. – С. 184–190.
13. Нейман, Л.А. К исследованию тяговых характеристик электромагнитных приводов с учетом зубчатости элементов магнитопровода / Л.А. Нейман, О.В. Рогова // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2013. – № 1(20). – С. 100–108.
14. Нейман, Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
15. Нейман, Л.А. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
16. Нейман, Л.А. Исследование перегрузочной способности циклического электромагнитного привода в зависимости от начального превышения температуры в переходных тепловых режимах / Л.А. Нейман // *Электротехника*. – 2014. – № 7. – С. 7–12.

17. Нейман, Л.А. Синхронный электромагнитный механизм для виброударного технологического оборудования / Л.А. Нейман // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 6 (207). – С. 17–19.
18. Нейман, Л.А. Приближенный расчет циклического электромагнитного привода с учтенным начальным превышением температуры в переходном тепловом процессе нагрева / Л.А. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 (22). – С. 113–122.
19. Нейман, Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 157–163.
20. Нейман, Л.А. Исследование сил одностороннего магнитного притяжения якоря соленоидного электромагнита / Л.А. Нейман // Электротехника. – 2015. – № 10. – С. 55–59.
21. Нейман, Л.А. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154–162.
22. Нейман, Л.А. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
23. Нейман, Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
24. Нейман, Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
25. Нейман, Л.А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87.
26. Нейман, Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 166–175.
27. Нейман, Л.А. Динамическая модель двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с комбинированным рабочим циклом / Л.А. Нейман // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 6 (117). – С. 97–106.
28. Нейман, Л.А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
29. Нейман, Л.А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров, К.А. Обухов // Омский научный вестник. – 2016. – № 6 (150). – С. 100–104.
30. Нейман, Л.А. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
31. Нейман, Л.А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 73–78.

32. Нейман, Л.А. Новый рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 72–81.

33. Нейман, Л.А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.

34. Нейман, Л.А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.

35. Нейман, Л.А. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.

36. Нейман, Л.А. Сравнение динамики рабочих циклов двухкатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия со свободным выбегом бойка / Л.А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 1 (34). – С. 98–115.

37. Нейман, Л.А. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с упругим реверсом бойка / Л.А. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 2 (35). – С. 73–83.

Патенты на изобретения

38. Пат. на полезную модель 111799 RU, МПК В25D13/00. Электромагнитная машина ударного действия / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман – № 2011128342/02; Заявл. 08.07.2011; Оpubл. 27.12.2011, Бюлл. № 36. – 5 с.: ил.

39. Пат. 2502855 RU, МПК E21B1/22. Электромагнитный ударный механизм / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, Е.Ю. Артебякина, А.А. Скотников – № 2012114361/03; Заявл. 11.04.2012; Оpubл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 5 с.: ил.

40. Пат. 2496214 RU, МПК H02K33/12, F16F7/104. Синхронный электромагнитный двигатель возвратно-поступательного движения / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников – № 2012100472/07; Заявл. 10.01.2012; Оpubл. 20.10.2013, Бюл. № 29. – 6 с.: ил.

41. Пат. 2496215 RU, МПК H02K33/12, F16F7/104. Электромагнитный двигатель возвратно-поступательного движения / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников – № 2012106101/07; Заявл. 20.02.2012; Оpubл. 20.10.2013, Бюлл. № 29. – 7 с.: ил.

42. Пат. 2472243 RU, МПК H01F7/06, H01F7/08, H02K33/12, H02K33/18. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем ударного действия / Л.А. Нейман, А.А. Скотников, В.Ю. Нейман, Ю.Б. Смирнова – № 2011123809/07; Заявл. 10.06.2011; Оpubл. 10.01.2013, Бюлл. № 1. – 5 с.: ил.

43. Пат. 2486656 RU, МПК H02K33/12, H02P25/02, H01F7/18. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем возвратно-поступательного движения / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, Е.А. Ерыгина – № 2011149247/07; Заявл. 20.02.2012; Оpubл. 27.06.2013, Бюлл. № 18. – 6 с.: ил.

44. Пат. 2491701 RU, МПК H02K33/12, B25D13/00. Синхронный электромагнитный ударный механизм / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников – № 2011149247/07; Заявл. 02.12.2011; Оpubл. 27.08.2013, Бюлл. № 24. – 6 с.: ил.

45. Пат. 2508980 RU, МПК B25D13/00. Синхронная электромагнитная машина ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, Е.Ю. Артебякина – 2012121695/02; Заявл. 25.05.2012; Оpubл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 7 с.: ил.

46. Пат. 2526852 RU, МПК H02K 33/02, H02K 1/06 Электромагнитный двигатель (варианты) / Л.А. Нейман, О.В. Рогова, В.Ю. Нейман, – № 2012146808/07; Заявл. 01.11.2012; Оpubл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 7 с.: ил.

Статьи в журналах и материалы конференций, входящих в международные базы SCOPUS, Web of Science

47. Neiman, V.Yu. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems / V.Yu. Neiman, L.A. Neiman, A.A. Petrova // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. – pp. 452–454.

48. Neyman, L.A. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage / L.A. Neyman, V.Yu. Neyman // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Vol. 2. – pp. 23–27.

49. Neyman, L.A. New linear synchronous cycle electromagnetic machines with inertial reverse / L.A. Neyman, N.I. Schurov, E.G. Langeman // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Vol. 2. – pp. 44–47.

50. Neyman, L.A. Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core / L.A. Neyman, V.Y. Neyman, A.S. Shabanov // 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – pp. 522–525.

51. Neyman, L.A. New method of the synchronous vibratory electromagnetic machine mechatronic module control / L.A. Neyman, V.Y. Neyman, K.A. Obukhov // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – pp. 516–519.

52. Neyman, L.A. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier / L.A. Neyman, V.Y. Neyman, A.S. Shabanov // 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – pp. 503–506.

53. Neyman, L.A. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies / L.A. Neyman, V.Y. Neyman // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Art. 032026.

54. Neyman, L.A. Low-frequency electromagnetic shock machine / L.A. Neyman, V.Yu. Neyman // Proceedings of the International conference Actual issues of mechanical engineering 2017 (AIME 2017), AER-Advances in Engineering Research, 2017. – Vol. 133. – pp. 549–554.

55. Neyman, L.A. Mathematical model of dynamics of two-coil synchronous electromagnetic impact machine with spring reversal of striker / L.A. Neyman, V.Yu. Neyman, A.V. Markov // Proceedings of the International conference Actual issues of mechanical engineering 2017 (AIME 2017), AER-Advances in Engineering Research, 2017. – Vol. 133. – pp. 555–560.

Публикации в прочих статьях и докладах

56. Нейман, В.Ю. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.

57. Neiman, L.A. Design factor comparison for geometrically similar cores of electromagnets / D.V. Evreinov, L.A. Neiman, V.Yu. Neiman, A.A. Petrova, Yu.B. Smirnova // 4th International Forum on Strategic Technologies (IFOST–2009), Ho Chi Minh City, 21–23 October 2009. – Ho Chi Minh City, 2009. – pp. 182–184.

58. Нейман Л.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II междунар. науч.-практ. конф., Саратов 14–15 апр. 2011 г. – Саратов: Изд-во Саратовский ГАУ им Н.И. Вавилова, 2011. – С. 271–277.

59. Нейман, В.Ю. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.

60. Нейман, В.Ю. Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман, // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.

61. Нейман, Л.А. Исследование зависимости температуры нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты: МКЭЭЭ-2012: тр. XIV междунар. конф. – Крым, Алушта, 23–29 сент. 2012 г. – Москва: Изд-во МЭИ, 2012. – С. 159–161.

62. Нейман, Л.А. Применение разностных уравнений для решения задачи нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах / Л.А. Нейман, А.А. Скотников // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета, – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – № 3 (69). – С. 123 – 128.

63. Нейман, Л.А. Повышение точности учета конструктивных параметров при проектировании электромагнитных виброударных устройств с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф. Томск, 11–13 нояб. 2013 г. / под ред. А.Ю. Арляпова, А.Б. Кима. – Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 256–260.

64. Нейман, Л.А. Синхронный электромагнитный механизм для виброударного технологического оборудования / Л.А. Нейман // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11–13 нояб. 2013 г. / под ред. А.Ю. Арляпова, А.Б. Кима. – Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 260–263.

65. Нейман, Л.А. Повышение эффективности рабочего цикла электромагнитного генератора силовых импульсов с синхронным взаимодействием элементов / Л.А. Нейман // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: материалы IX междунар. науч.-техн. конф., Омск 05–06 декабря 2013 г. – Омск: Изд-во Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 356–362.

66. Neyman, L.A. Investigation of pulse electromagnetic drive operation time dependence on power overload factor in transient modes / L.A. Neyman, A.A. Petrova // The 8th International Forum on Strategic Technologies (IFOST–2013): proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 2. – pp. 567–568.

67. Neyman, L.A. Maximization of energy parameters in an electromagnetic device/ L.A. Neyman, A.A. Petrova, V.Y. Neyman // The 8th International Forum on Strategic Technologies (IFOST–2013): proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 2. – pp. 569–571.

68. Нейман, Л.А. Реализация способа управления двухкатушечным электромагнитным приводом ударного действия / Л.А. Нейман // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: 1 междунар. (IV Всерос.) науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 12–15.

69. Нейман Л.А. Управление тепловой нагрузкой линейных синхронных электромагнитных машин виброударного действия / Л.А. Нейман // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., –Томск, 9–11 окт. 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 73–77.

70. Нейман, Л. А. Приближенный расчет повторно-кратковременного режима работы циклического электромагнитного привода / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): материалы III

- международ. конф., Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. – Екатеринбург: Изд-во УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 211–213.
71. Нейман, Л.А. Приближенный метод оценки выходных показателей электромагнитного ударного привода по его средней температуре нагрева в переходных режимах / Л.А. Нейман // *Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ-2014): тр. XV-ой междунар. конф.*, Крым, Алушта, 21–27 сент. 2014. М.: Изд-во МЭИ (ТУ), 2014. – С. 170–171.
72. Нейман, В.Ю. Новый способ управления двухкатушечной синхронной электромагнитной машиной / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман // *Электромеханика, Электротехнологии, Электрические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ-2014): тр. XV-ой междунар. конф.* – Крым, Алушта, 21–27 сент. 2014 г. – Москва: Изд-во МЭИ (ТУ), 2014. – С. 172–173. – Препринт электрон. – 1 электрон. опт. диск (CD ROM).
73. Нейман, Л.А. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Актуальные проблемы в машиностроении.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – № 1 (1). – С. 256 – 259.
74. Нейман, Л.А. О точности аналитического расчета радиальных сил однофазного магнитного притяжения цилиндрических некоаксиальных элементов магнитопровода // *Электротехника, электромеханика и электротехнологии: сб. науч. тр.* – Новосибирск: НГТУ. – 2014. – С. 78–85.
75. Нейман Л.А. Методика приближенного теплового расчета электромагнитного ударного привода в переходном процессе нагрева // *Электротехника, электромеханика и электротехнологии: сб. науч. тр.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ – 2014. – С. 86–93.
76. Neyman, L.A. Linear synchronous electromagnetic machines and their control principles / L.A. Neyman, V.Y. Neyman, Y.V. Morozov // *10 International Forum on Strategic Technologies (IFOST–2015), proc., Indonesia, Bali, 3–5 June 2015.* – Yogyakarta, 2015. – pp. 171–174.
77. Нейман, Л.А. Тепловой расчет ударного узла с электромагнитным приводом / Л.А. Нейман // *Актуальные проблемы в машиностроении.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – № 2. – С. 249–255.
78. Нейман, Л.А. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // *Актуальные проблемы в машиностроении.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – № 2. – С. 280–285.
79. Нейман, Л.А. К учету аналогов механических характеристик модели электромагнитного привода колебательного движения / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров // *Фундаментальные проблемы науки: сб. статей междунар. науч.-прак. конф.*, Уфа, 01 октяб. 2015 г. – Уфа: Изд-во Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2015. – С. 43–51.
80. Нейман, Л.А. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода / Л.А. Нейман, С.А. Шабанов, В.Ю. Нейман // *Теория и практика современной науки: материалы XIX междунар. науч.-прак. конф.* – Москва: Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований», 2015. – С. 58–63.
81. Нейман, Л.А. Решение задачи распределения температурного поля электромагнитного ударного узла с цилиндрической двухсекционной обмоткой / Л.А. Нейман // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. VI междунар. науч.-прак. конф.* 21-23 мая 2015 г. – Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 463–468.
82. Neyman, L.A. Investigation of non-stationary processes in a nonlinear inductor with the massive magnetic core by structured modeling methods // L.A. Neyman, V.Y. Neyman, A.S. Shabanov // *Applied Mechanics and Materials.* – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – pp. 38–43.

83. Нейман, Л.А. Динамическая модель двухмассовой электромеханической системы с электромагнитным возбуждением / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров, К.А. Обухов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII: междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 18 апр. 2016 / под об. ред. В.А. Трушкина. – Саратов: Изд-во ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2016. – С. 161–165.

84. Нейман, Л.А. Разработка математической модели динамики многомассовой ударной колебательной системы с электромагнитным возбуждением / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров // «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты»: труды МКЭЭЭ-2016, XVI-ой междунар. конф., Алушта, 19-24 сент. 2016 г. – Крым, Алушта. Москва: Изд-во Фирма Знак, 2016. – С. 259–260.

85. Нейман, Л.А. Влияние механических потерь на выходные показатели электромеханической колебательной системы с электромагнитным возбуждением / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск Изд-во: НГТУ. – 2016. – № 3. – С. 234–240.

86. Нейман, Л.А. Методика измерения мощности потерь в механической колебательной системе с электромагнитным возбуждением / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск: Изд-во: НГТУ. – 2016. – № 3. – С. 247–252.

87. Нейман, Л.А. Анализ процесса взаимодействия импульсов сил в электромагнитной ударной системе с потерями кинетической энергии / Л.А. Нейман // Научный альманах. – 2016. – № 6–2 (19). – С. 134–139.

88. Нейман, Л.А. Анализ динамических характеристик синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка / Л.А. Нейман, Н.И. Щуров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 81–87.

89. Нейман, Л.А. Решение уравнений динамики рабочего процесса электромагнитной ударной машины с инерционным реверсом бойка / Л. А. Нейман // Инновации в машиностроении (ИНМАШ – 2017): сбор. тр. VIII междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск 28–30 сент. 2017. – Новосибирск: Изд-во: НГТУ, 2017. – С. 158–166.

90. Neyman, V.Y. Dynamical model of the synchronous impact electromagnetic drive mechatronic modul / V.Y. Neyman, L.A. Neyman // The 12th International forum on strategic technology (IFOST 2017): proc., Ulsan, S.Korea, 31 May– 2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol. 1. – pp. 188–193.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве: [4, 6, 7, 22, 61, 62, 66] – постановка задачи и изложение основных теоретических положений и выводов; [21, 23, 25, 28–31, 33–36, 48, 50–52, 82–85, 88–90] – разработка математических и компьютерных моделей, выполнение моделирования, обобщение результатов анализа; [14, 26, 49, 53, 54, 58, 60, 67, 73, 76, 78] – постановка и решение задачи, анализ и обобщение результатов и выводов; [1–3, 5, 13, 47, 57, 79, 80, 86] – разработка методик исследований, анализ результатов и выводов; [15, 56, 70] – разработка методик расчета. В остальных работах вклад автора распределён в равной мере.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Формат 60×84/16, объем 2.5 п.л., тираж 100 экз.
Заказ № 845, подписано в печать 05.06.2018 г.

