

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Нейман Людмилы Андреевны на тему «Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

1. Актуальность темы диссертации

Диссертация Нейман Л.А. посвящена вопросам создания и совершенствования низкочастотных синхронных электромагнитных машин ударного действия (СЭМУД), развитию общей теории машин, методов и подходов, обеспечивающих широкие возможности их анализа и синтеза, направленные на повышение эффективности процесса электромеханического преобразования и передачи энергии посредством ударного взаимодействия с деформируемой средой.

Целесообразность проведения работ по созданию и совершенствованию машин импульсного действия очевидна. Импульсные технологии с энергетической точки зрения считаются достаточно совершенным и менее энергоёмким процессом.

Перспективным направлением в области импульсных технологий является их реализация с помощью электрических ударных систем, в качестве которых выступают низкочастотные СЭМУД, использующие в качестве приводного устройства линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД) возвратно-поступательного движения.

Применение ЛЭМД наиболее просто решает вопрос преобразования электрической энергии в кинетическую энергию ударника и упрощает кинематическую схему машины за счет исключения передаточных механизмов преобразования вида движения. Другим достоинством применения ЛЭМД является возможность достижения более высоких значений КПД при работе в околорезонансных режимах в сравнении с аналогичными машинами ударного действия, использующими электропривод вращательного действия.

В результате многолетних исследований созданы предпосылки для разработки и расчета СЭМУД, методики экспериментальных исследований таких машин и пути их совершенствования, получены результаты по их серийному производству. Однако следует признать, что исследования, выполненные для данного класса машин, имеют разобщённый характер и основаны в своем

большинстве на применении статических подходов, что ограничивает их использование в рамках решаемой проблемы.

В этой связи решение вопросов создания и совершенствования СЭМУД, развития методов анализа и синтеза, подходов, обеспечивающих их проектирование и учитывающих динамику процессов, зависящих от скорости движения, является сложной проблемой и актуальной задачей для её решения.

2. Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка из 244 наименований и четырёх приложений. Общий объём диссертации составляет 400 страниц машинописного текста, содержит 220 рисунков и 12 таблиц.

3. Анализ содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность темы, отражено современное состояние по решаемой проблеме. Сформулированы цель и задачи исследований. Определен объект и предмет исследования. Приведена теоретическая и практическая значимость результатов, научная новизна и положения, выносимые на защиту. Отражена реализация и апробация результатов работы.

В первой главе рассмотрены современное состояние и методология построения СЭМУД. Выполнен структурный анализ существующих и новых вариантов схем СЭМУД. На уровне изобретения представлены новые технические решения вариантов схем, направленные на улучшение их эксплуатационных и энергетических показателей.

К существенным результатам данной главы следует отнести усовершенствованные подходы рационального выбора ЛЭМД. Автором разработана методика сравнения вариантов цилиндрических ЛЭМД одинакового объема, имеющих произвольную конфигурацию магнитной цепи. Обоснована перспективность применения известного метода определения пределов рационального применения разновидностей ЛЭМД для привода СЭМУД по распространённым в практике значениям показателя «конструктивный фактор», полученным с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля.

Во второй главе дается подробный анализ энергопреобразовательных процессов вариантов схем СЭМУД, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. Выполненный на качественном уровне анализ энергопреобразовательных про-

цессов позволил исследовать физические явления, лежащие в основе функционирования электромеханических преобразователей энергии. Особое внимание в главе уделено изложению закономерностей протекающих процессов взаимного преобразования электрической, магнитной, кинетической и потенциальной энергии. Полученные результаты в данной главе дополняют базовые знания фундаментальных положений теории электромагнитных импульсных систем, которые составляют научные основы для их создания и совершенствования.

В третьей главе приведена классификация и дана оценка конструктивного совершенства применяемых систем охлаждения СЭМУД с естественной и принудительной системой вентиляции машины. При допущении, что СЭМУД является однородным телом методом дискретных преобразований Лапласа для уравнений с решетчатыми функциями получено приближенное решение для циклического нагрева в переходном тепловом процессе с учтённым значением начального превышения перегрева в рабочем цикле машины. На основании приближенного решения для циклического нагрева, учитывающего колебания температуры в рабочем цикле машины, получен ряд важных приближенных расчетных соотношений. В частности, установлена связь между максимальным количеством произведённых рабочих циклов (или ударов), продолжительностью времени работы, энергией и частотой ударов, а также теплофизическими и геометрическими параметрами в зависимости от начального перегрева. Получены приближенные расчётные зависимости для энергии удара, устанавливающие предельные значения энергии в зависимости от количества произведённых рабочих циклов (или ударов) с учтённым начальным превышением температуры на момент включения. Дана оценка перегрузочной способности СЭМУД относительно средней температуры в течение времени цикла для нулевых начальных условий. Разработаны методики приближенного теплового расчета СЭМУД зависящие от параметров, характеризующих циклический режим работы и способствующие в решении вопросов управления их тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины. Рассмотрены примеры теплового расчета.

Четвертая глава посвящена вопросам комплексной оценки силам сопротивления, противодействующим ускорению ударной массы бойка СЭМУД, и потерям энергии в электромеханической системе.

Для самого общего случая выработаны рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения, дана оценка этой силы и её отдельных компонент по отношению к движущей силе в зависимости от магнитной асимметрии. Показано, что точность при динамических расчетах в существенной

степени зависит от точности воспроизведения аналогов механических характеристик, связанных с рассеянием энергии как за счет демпфирующих свойств упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого трения. Учитывая, упругие и диссипативные свойства материала установлены зависимости, отражающие влияние параметров ударной системы с потерями кинетической энергии. Разработаны варианты моделей для расчета потерь мощности в стальных элементах магнитопровода от вихревых токов в зависимости от закона формирования напряжения на входе и насыщения ферромагнитных участков.

Необходимо согласиться с автором диссертации, что для создания точной динамической модели ударного узла СЭМУД необходимо обладать точной количественной оценкой мощности или энергии потерь в механической, магнитной и электрической подсистеме, а также иметь их точное математическое описание.

В пятой главе представлены результаты исследования многомассовых электромеханических колебательных систем (ЭМКС) без учета ударного взаимодействия. Разработаны математические модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД, обеспечивающие широкие возможности для всестороннего анализа электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах при возбуждении вынужденных периодических колебаний. Показано, что для построения математических моделей, учитывающих колебательные взаимодействия многомассовых систем, наиболее целесообразно применять метод Лагранжа.

Рассмотрены алгоритмы расчета и варианты схемной реализации компьютерных моделей методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Исследовано влияние процессов рассеяния энергии в упругих связях и сил трения скольжения механической системы на рабочие характеристики электромеханической колебательной системы. Приведены результаты анализа ЭМКС с ЛЭМД при возбуждении периодических ударных импульсов сил.

Показано, что процесс ударного взаимодействия следует рассматривать как результат наложения вынужденных, свободных колебаний в механической системе и периодических импульсов сил. Рассмотрен алгоритм расчета и вариант схемной реализации четырехмассовой модели ударного узла, учитывающей ударные взаимодействия и различного рода потери энергии.

Выполнена верификация компьютерных моделей сравнением расчетных значений с данными физического эксперимента.

В шестой заключительной главе разработаны математические модели вариантов конструктивных схем СЭМУД. Показано, что в процессе создания моделей все они имеют единую методологическую основу при построении. В основе построения математических моделей при описании движения ЭМКС используются вариационные принципы на основе уравнений Лагранжа второго рода. Автором обосновано применяется данный принцип, позволяющий наиболее в простой форме получить математическое описание движения инерционных масс, связанных упругими связями, которые представляют собой относительно сложную динамическую систему с большим числом входных переменных, зависящих от скорости и её производной. Ключевым вопросом исследований данной главы является разработка единого методологического подхода к математическому описанию различных по конструкции вариантов схем СЭМУД, ориентированных на исследование электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах, обеспечивающих широкие возможности для их анализа и синтеза методами структурного моделирования с большим набором входных и выходных переменных. Это является существенным вкладом в развитие расчетных методов определения параметров работы СЭМУД, внедрение которых в практику проектирования позволит сократить сроки выполнения проектных работ и повысить их качество. Рассмотрены возможности численной реализации моделей при анализе рабочих процессов и выполнена верификация компьютерных моделей, созданных средствами Matlab Simulink. Подтверждена эффективность в использовании новых рабочих циклов при питании от промышленной сети. Завершающим этапом исследований данной главы является разработка обобщенных математических моделей однокатушечных и двухкатушечных СЭМУД.

В заключении обобщены полученные в ходе диссертационного исследования научные и практические результаты работы.

4. Новизна исследования и полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в решении комплексной научно-технической проблемы создания и совершенствования линейных синхронных электромагнитных машин ударного действия, в развитии общей теории машин, в разработке подходов, обеспечивающих возможности анализа и синтеза, направленные на повышение эффективности процесса электромеханического преобразования и передачи энергии посредством ударного взаимодействия, в частности:

1. Теоретически и практически получила развитие научная концепция линейной синхронной электромагнитной импульсной системы, способствующая в повышении эффективности процесса электромеханического преобразования и передачи кинетической энергии бойка с частотой, кратной частоте промышленного источника.

2. Разработана методика количественной и качественной оценки сравнения цилиндрических вариантов ЛЭМД одинакового объема, имеющих произвольную конфигурацию магнитной цепи.

3. Обоснована перспективность метода определения пределов рационального применения разновидностей ЛЭМД для импульсных систем по распространенному в практике показателю «конструктивный фактор» из анализа расчетных зависимостей экономичности двигателя, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля. Впервые дана количественная оценка степени влияния определяющих величин на значения показателя «конструктивный фактор» и показателя экономичности ЛЭМД.

4. Развита принципы построения и обоснованы новые рабочие циклы вариантов схем СЭМУД, разработаны новые технические решения, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик и энергетических показателей машин.

5. Выполнен анализ энергопреобразовательных процессов вариантов схем СЭМУД, установлены особенности и закономерности этих процессов, характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка.

6. Установлена связь между энергией удара и частотой ударов СЭМУД, способствующая из условия допустимого нагрева и колебаний температуры в рабочем цикле машины в решении вопросов управления тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины. Разработаны методики приближенного теплового расчета с целью оптимизации работы СЭМУД в соответствии с заданным рабочим процессом.

7. Дана комплексная оценка силам, противодействующим ускорению бойка, и потерям энергии в электромеханической системе. Выработаны рекомендации по учету силы одностороннего магнитного притяжения и дана количественная оценка этой силы и её отдельных компонент по отношению к движущей силе. Выполнена модернизация известного в практике выражения силы одностороннего магнитного притяжения, что расширяет границы существующего расчёта относительно установленных ограничений по эксцентриситету.

8. Разработаны варианты моделей и созданы алгоритмы по расчету потерь мощности от вихревых токов в массивном магнитопроводе для различных законов формирования напряжения на входе электромеханического преобразователя и насыщения ферромагнитных участков.

9. Разработаны математические и компьютерные модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД, учитывающие потери энергии, нелинейности характеристик магнитных материалов, потоки рассеяния, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей механической системы, реализованные методами структурного моделирования без учета ударного взаимодействия.

10. Разработан единый методологический подход к математическому описанию различных вариантов схем СЭМУД, учитывающий ударные взаимодействия, и созданы их компьютерные модели, обеспечивающие широкие возможности для проведения анализа и синтеза моделей методами структурного моделирования с большим набором входных и выходных переменных.

5. Практическая значимость и реализация результатов

К практической значимости работы Нейман Л.А. можно отнести следующее:

1. Новые принципы построения схем СЭМУД и реализованные на данных принципах новые рабочие циклы и способы управления. Комплекс новых технических решений, улучшающий эксплуатационные характеристики и повышающий энергетические показатели машин;

2. Методика оценки при сравнении цилиндрических ЛЭМД одинакового объема, имеющих произвольную конфигурацию магнитной цепи;

3. Усовершенствованный подход рационального выбора разновидностей ЛЭМД на основании показателя «конструктивный фактор» с использованием расчетных зависимостей показателя экономичности, полученных с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля;

4. Методики приближенного расчета выходных параметров СЭМУД, способствующие решению вопросов управления тепловой нагрузкой в зависимости от начального перегрева в рабочем цикле машины;

5. Практические рекомендации по учету сил сопротивления, противодействующих ускорению бойка;

6. Варианты моделей и алгоритмы расчета потерь мощности в стальных элементах магнитопровода от действия вихревых токов;

7. Математические модели многомассовых ЭМКС с ЛЭМД и вариантов СЭМУД, ориентированные на исследование электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах с использованием методов структурного моделирования, а также их компьютерные модели. Разработанные обобщенные математические модели однокатушечных и двухкатушечных СЭМУД.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, использованы при реализации стратегической программы развития НГТУ, в виде практических разработок в ЗАО «ЭРАСИБ», в виде инженерных методик расчета в ИГД СО РАН (г. Новосибирск), а также в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета.

6. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается полнотой и обстоятельностью анализа современного состояния исследований в предметной области по теме диссертационного исследования, корректностью постановок задач и строгими в рамках принятых допущений математическими выкладками. Основные теоретические положения и выводы подтверждены путём сравнения компьютерного моделирования и эксперимента, сопоставлением с данными исследований других авторов, апробацией основных положений работы на международном и всероссийском уровне.

7. Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности

Содержание диссертации и автореферата, область, предмет и объект исследования соответствуют паспорту научной специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, отрасль – технические науки.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты, полученные в процессе её выполнения.

8. Соответствие критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание учёных степеней

Диссертационная работа Нейман Л.А. в полном объёме отвечает критериям, установленным в Положении «О порядке присуждении учёных степеней», утверждённом Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842.

В диссертации соблюдены следующие соответствия критериям установленным в положении п. 9–14.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для развития электротехнической отрасли страны.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Материалы и результаты исследований изложены в объёме, достаточном для понимания. Материалы доступны и презентабельны в научном и техническом отношении.

В диссертации приведены сведения о практическом использовании полученных в работе научных результатов. Предложенные автором диссертации решения в достаточной степени аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в 90 печатных изданиях, из которых 37 входят в перечень ведущих рецензируемых изданий, утверждённых ВАК РФ, 8 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель, 9 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные наукометрические базы SCOPUS и WoS.

В диссертации сделаны ссылки на автора и источник заимствования материалов или отдельных результатов, а также отмечены результаты использования научных работ, выполненных соискателем лично или в соавторстве.

9. Основные вопросы и замечания по работе возникшие в ходе ее прочтения

1. Анализ влияния параметров ударной системы на эффективность процесса формирования ударных импульсов сил при работе СЭМУД (раздел 4.3.2) представлен только на уровне математических выкладок. Следовало оптимизировать и осуществить выбор параметров данной системы, обладающей

наибольшей эффективностью передачи кинетической энергии бойка в деформируемую им среду, что позволило бы повысить ценность научных результатов.

2. При анализе рабочих циклов вариантов схем СЭМУД не используются критерии сравнения вариантов между собой. Также стоило сформулировать понятие рационального рабочего цикла.

3. Не дана оценка погрешности инженерных методик приближенного теплового расчета (см. раздел 3.3.2, стр. 159; раздел 3.4.2, стр. 167). Стоило привести экспериментальную часть по нагреву СЭМУД в переходных режимах работы и сравнить с результатами выполненных расчетов.

4. В работе (см. графики рис. 5.26, рис. 5.38 и рис. 6.38) не приведена методика проведения экспериментов с анализом инструментальных погрешностей.

5. Очевидными признаками научной новизны обладают приведенные в шестой главе обобщенные модели однокатушечного (раздел 6.8.1, стр. 343) и двухкатушечного (раздел 6.8.2, стр. 345) вариантов СЭМУД. Полученные новые результаты следовало включить в положения, определяющие теоретическую и практическую значимость выполненных автором исследований.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки научной и практической значимости диссертации.

10. Заключение

Диссертационная работа Нейман Л.А. на тему «Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему и имеющую важное прикладное значение для соответствующей отрасли знаний.

Диссертация обладает научной новизной и отвечает требованиям п. 9 действующего положения – является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для развития электротехнической отрасли страны.

Содержание диссертации соответствует её названию и поставленным задачам, а также паспорту научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

По своей актуальности, степени научной новизны, теоретической и практической значимости, а также уровню и целостности, полученных результатов, работа удовлетворяет критериям п. 9–11, 13, 14 положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемых к диссертациям, а её автор **Нейман Людмила Андреевна** заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»



Абрамов Андрей Дмитриевич
"11" 09 2018 г.

Подпись Абрамова А.Д. удостоверяю:

Физ. отг. Дмитроу-гор.

Т. м. Москвитина

Сведения об оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Сокращенное название организации: (ФГБОУ ВО СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Телефон рабочий: +7 (383) 328-03-92. E-mail: abramov@stu.ru.

Отзыв получен 14.09.18 ЛМ / Дыбка МА /

С отзывом ознакомлена. 25.09.18г. Нейман / Нейман Л.А. /