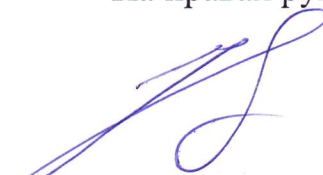


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА»

На правах рукописи



Каргин Виталий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ АПК ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАШИН С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ**

**Специальность 05.20.02 – «Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Усанов Константин Михайлович

Официальные оппоненты: **Коняев Андрей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы»

Чарыков Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева», профессор кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»

Нейман Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники»

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет».

Защита состоится «__» _____ 20__ года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» и на сайте: <http://www.sgau.ru>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**

Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сложившаяся ситуация в развитии сельского хозяйства РФ выдвигает перед инженерами-разработчиками актуальную задачу создания конкурентоспособной техники для реализации перспективных или совершенствования существующих технологий как в отдельных традиционных отраслях сельхозпроизводства, так и в агропромышленном комплексе (АПК) в целом.

Непременными условиями достижения устойчивого ускорения здесь выступают поиск и реализация перспективных методов и технических подходов, позволяющих усовершенствовать и одновременно упростить конструкцию, повысить КПД машин, механизировать операции и процессы, обеспечить высокое качество выполняемых работ в полеводстве, животноводстве, переработке продукции, обслуживании сельскохозяйственной техники. В этой связи имеют перспективу и представляют интерес установки и агрегаты, оснащаемые, наряду с традиционными электроприводами, специальными электромагнитными приводами возвратно-поступательного движения на базе линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД-приводы), в которых механическая энергия движущихся элементов обеспечивается совокупностью управляемых силовых импульсов и безударными или ударными механическими взаимодействиями исполнительных органов двигателя и рабочей машины при передаче энергии.

Предпочтительность применения ЛЭМД-приводов в обоснованных случаях объясняется возможностью упрощения кинематических схем и конструкций машин, уменьшения многоступенчатости энергопреобразования, повышения удельных характеристик изделий, усовершенствования ряда технологий, улучшения экологичности и достижения ресурсосбережения в АПК. Прогнозные оценки, в частности, показывают, что использование ЛЭМД-приводов взамен традиционных позволяет сократить энергозатраты на реализацию некоторых операций от двух и более раз и сэкономить за год в среднем не менее 1000 кВт·ч электроэнергии на каждую систему.

При этом наиболее существенное препятствие на пути замены традиционных электроприводов электромагнитными – неприспособленность известных машин с ЛЭМД к операциям и процессам сельхозпроизводства, а необходимым условием расширения областей их эффективного применения в технологиях АПК, основанных на использовании силовых дискретных воздействий, является повышение эффективности как собственно электромагнитных двигателей, так и совершенствование систем с их использованием стационарного и мобильного исполнения.

Поскольку линейный электромагнитный двигатель обоснованно выдвигается главной операциональной «единицей» при анализе таких систем, в настоящее время значительная часть исследований направлена на совершенствование и повышение эффективности именно ЛЭМД. При этом изучению других важных компонентов системы, например, устройств передачи механической энергии от двигателя исполнительному органу, системы питания и

управления, определяющих ее практическую пригодность и оказывающих непосредственное влияние на показатели, при исследовании ЛЭМД-приводов уделяется значительно меньше внимания.

Недостаточность проработки общесистемных вопросов и задач по определению рациональной структуры привода, организации взаимодействия элементов и подсистем, учету влияния внешней среды, выбору энергетически выгодных режимов действия, оптимальному управлению системой и др. сдерживает развитие и ограничивает функциональные возможности ЛЭМД-приводов.

Преодолеть подобную ограниченность, определить недостаточность прежних условий для постановки и решения новых практических задач, обозначить отличные от существующих структурные и типологические характеристики элементов ЛЭМД-приводов позволяет системный подход. Таким образом, комплексное, с учетом принципов этого подхода, решение проблемы совершенствования и создания приводов с электромагнитными двигателями, повышающими эффективность и экологичность целого ряда операций и процессов в технологиях сельхозпроизводства и АПК, представляется актуальным.

Основанием для данной работы, представляющей собой продолжение комплекса работ по созданию и совершенствованию машин с линейными электромагнитными двигателями, предназначенных для механизации трудоемких технологических процессов, являются программы:

- Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы (утв. 20 декабря 2012 г., № 2433-р);
- Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (утв. 21 мая 2013 г., № 426);
- Государственная программа Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области на 2014–2020 годы», подпрограмма «Техническая и технологическая модернизация, научно-инновационное развитие на 2014–2020 годы» (утв. 2 октября 2013 г., № 520-П);
- Приоритетное научное направление ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (регистрационный номер 01201151795).

Степень разработанности темы. Исследованиями в области разработки и повышения эффективности линейных электрических двигателей и приводов на их основе занимались и занимаются А.И. Москвитин, П.М. Алабужев, О.Д. Алимов, А.В. Фролов, Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковалев, Ф.Н. Сарапулов, М.А. Любчик, В.В. Ивашин, Б.Ф. Симонов, О.Н. Веселовский, В.К. Манжосов, А.Н. Мирошниченко, Г.Г. Угаров, В.Н. Гурницкий, А.Ю. Коняев, Г.В. Никитенко, В.Ю. Нейман, В.И. Чарыков, В.П. Певчев, В.И. Мошкин, Р.С. Аипов, К.М. Усанов, Л.А. Нейман, Е.М. Тимошенко, А.В. Львицын, В.Н. Федонин, Б.В. Клименко, А.Т. Малов, Д.А. Вырыханов, А.В. Волгин, А.П. Моисеев и др.

Приоритетные направления в исследованиях большинства ученых связаны с разработкой и повышением эффективности собственно линейных электрических, в том числе электромагнитных, двигателей, что затрудняет их интегрирование в существующие технологии АПК. Рациональная структура и организация взаимодействия элементов электропривода ЛЭМД, оптимальное управление системой и другие задачи в настоящее время требуют пристального внимания, совершенствования и представляют большой научно-практический интерес.

Цель работы – решение комплексной научно-технической проблемы создания и совершенствования силовых электромагнитных ударных и безударных приводов и машин, обеспечивающих энергосбережение в технологиях АПК, за счет повышения эффективности элементов системы электропривода.

Степень изученности, уровень технического и технологического совершенства подсистем – взаимодействующих электромеханических, механических преобразователей электроэнергии, управляющих устройств, – в известных ЛЭМД-приводах значительно разнятся. При этом существенное противоречие здесь состоит в том, что, с одной стороны, предложенные к настоящему времени двухзачорные броневые цилиндрические ЛЭМД возвратно-поступательного движения реализуют лишь ограниченное однонаправленное перемещение якоря или инструмента и имеют значительный перегрев обмотки, определяющий низкую, неконкурентную нормированную продолжительность включения ПВ, с другой – ЛЭМД-приводы операций и процессов АПК должны обеспечивать не только одно- или двунаправленное необходимые перемещения исполнительного органа, но и повышенное нормированное значение ПВ, соответствующее технологии.

Задачи исследований:

1. выявить особенности и обосновать конкурентность применения ЛЭМД-приводов в технологиях АПК;
2. сопоставить показатели магнитных систем и теоретически обосновать способ улучшения функциональности броневых цилиндрических ЛЭМД;
3. разработать математические модели стационарных и нестационарных тепловых процессов, оценить влияние значимых факторов на нагрев ЛЭМД; сформулировать рекомендации по интенсификации охлаждения с целью увеличения продолжительности включения двигателя;
4. усовершенствовать существующие и предложить новые устройства вывода и передачи механической энергии от двигателя к исполнительному органу, интегрированные в конструкцию ЛЭМД-привода;
5. развить принципы построения и разработать конструктивные схемы ударных и безударных ЛЭМД-приводов, обеспечивающих новые функциональные возможности, лучшие характеристики и энергетические показатели системы;
6. проанализировать принципы построения и разработать схемы электрических преобразователей с адаптацией выходных параметров ЛЭМД-приводов при переменной нагрузке;
7. провести экспериментальные исследования рабочих процессов в ЛЭМД-приводах, оценить показатели и выходные характеристики с учетом

оказывающих существенное влияние на режимы работы ЛЭМД-приводов факторов;

8. провести производственные испытания и технико-экономическую оценку результатов внедрения созданных образцов машин с ЛЭМД-приводом.

Объект исследования – ЛЭМД-привод для операций, процессов, технологий АПК.

Предмет исследования – рабочие процессы ЛЭМД-привода, определяемые свойствами и характеристиками компонентов системы.

Научную новизну работы представляют:

- теоретические имитационные модели цилиндрического двухзазорного электромеханического преобразователя электромагнитного типа с магнитной системой со сквозным осевым каналом;
- теоретические модели процессов нагревания-охлаждения цилиндрического электромеханического преобразователя электромагнитного типа и способы интенсификации теплообмена в ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами;
- энергопреобразовательные режимы ударных, безударных ЛЭМД-приводов, определяемые совокупностью функциональных компонентов и способами электропитания электромеханического преобразователя привода;
- результаты экспериментальных исследований полноразмерных установок и физических моделей приводов ударного и неударного действия с линейными электромагнитными двигателями.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке теоретической имитационной модели магнитной системы линейного электромагнитного двигателя со сквозным осевым каналом, позволяющей с заданной точностью определять статические и динамические характеристики ЛЭМД при варьировании конструктивных и режимных параметров;
- в обосновании функциональных схем устройств вывода и передачи механической энергии «двигатель – исполнительный орган» и разработке конструктивных схем машин с ЛЭМД, обеспечивающих при ограниченном ходе якоря одно- и двунаправленное неограниченное перемещение исполнительного органа;
- в обосновании рекомендаций по выбору системы охлаждения ЛЭМД с учетом его конструктивных и режимных параметров;
- в разработке управляющих устройств с адаптацией выходной механической энергии ЛЭМД-привода к свойствам нагрузки;
- в применении результатов исследований в учебном процессе образовательных заведений при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по вопросам проектирования специальных электроприводов.

Методология и методы исследований. При выполнении работы учтены основополагающие принципы системного подхода. Теоретические исследования проведены с использованием законов электромеханики, теоретических основ электротехники, основных положений теории электрических машин и

автоматизированного электропривода, аппарата математического анализа и численных методов решения задач.

Основные методы исследования – эмпирические (наблюдение, сравнение, измерение), экспериментально-теоретические, метод теории планирования многофакторных экспериментов, статистические методы обработки данных, анализ, синтез и обобщение полученных результатов.

Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных и производственных условиях с использованием современной измерительной аппаратуры. Полученные данные обрабатывали методами математической статистики, а результаты, полученные графическим способом, – с помощью программ Microsoft Excel. Применительно к задачам созданы экспериментальные стенды для лабораторных исследований физических моделей и опытных образцов машин с ЛЭМД.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- теоретические модели, позволяющие оценивать влияние конструктивных параметров магнитной системы линейного электромагнитного двигателя на его выходные показатели;
- теоретические модели процессов нагревания-охлаждения и научно обоснованные рекомендации по интенсификации теплообмена в ЛЭМД;
- математическая модель управляющего устройства с адаптацией энергии удара ЛЭМД к изменению нагрузки; рекомендации по технической реализации способа управления и адаптации настроек в зависимости от свойств нагрузки;
- результаты физического моделирования и экспериментальных исследований ударных и безударных ЛЭМД-приводов; качественные и количественные зависимости выходных показателей от наиболее значимых факторов и предпочтительные энергопреобразовательные режимы в ЛЭМД ударных и безударных машин при питании от емкостного накопителя энергии;
- оценка экономической эффективности внедрения ЛЭМД-приводов в технологии АПК.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач и разработке плана исследований; проведении анализа литературных источников по обоснованию актуальности изучаемой проблемы; выполнении теоретических исследований; проведении лабораторных испытаний; разработке электрических преобразователей, обеспечивающих автоматическую подстройку выходных характеристик ЛЭМД-привода в функции изменения нагрузки; совершенствовании конструкций ударных и безударных машин с ЛЭМД; проведении лабораторных и производственных испытаний; подготовке и публикации научных статей по тематике работы.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований обеспечена применением высокоточной измерительной аппаратуры и приборов, стандартных методик исследований, обработкой экспериментальных данных методами математической статистики, сходимостью результатов теоретического и экспериментального исследований рабочих процессов и характеристик ЛЭМД-приводов, их подтверждением при

практической реализации разработок в лабораторных и производственных условиях.

Технические возможности и эффективность ЛЭМД-приводов подтверждены производственными испытаниями и внедрены на предприятиях ООО «МСК ЭНЕРГО» (г. Саратов); АО «Лысогорская птицефабрика» (р.п. Лысье Горы, Саратовская обл.), ОАО «Знак Хлеба» (г. Саратов), ООО «ИспЭК» (г. Уфа, республика Башкортостан), ООО «Кетовская агрохимия» (Кетовский район, Курганская обл.), ООО «ЭлектроСила Монтаж» (г. Саратов), ИП «Глава КФХ «Пасечный Андрей Иванович» (р.п. Лысье Горы, Саратовская обл.).

Основные научные положения, результаты исследований, выводы и практические рекомендации диссертации были доложены, обсуждены и одобрены:

- на X Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2–3 мая 2004 г.);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, 21–24 сентября 2004 г.);
- на III Всероссийской конференции «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин, 20–22 апреля 2005 г.);
- на конференции, посвященной 119-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (Саратов, 23–25 ноября 2006 г.);
- на Международных научно-практических конференциях «Вавиловские чтения» (г. Саратов, 2007, 2008, 2009 гг.);
- на III и IV Международных научно-практических конференциях «Технология и продукты здорового питания» (г. Саратов, 2009, 2010 гг.);
- на XV Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции» (г. Тамбов, 2009 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного производства» (г. Курск, 2010 г.);
- на I–IX Международных научно-практических конференций «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2010–2018 гг.);
- на XLIX и L Международных научно-практических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, 2010, 2011 гг.);
- на Международной научно-практической конференции «Инновации, наука и образование XXI века» (г. Саратов, 2010 г.);
- на Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г. (г. Саратов, 2011 г.);
- на Шестом Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (г. Саратов, 2011 г.);
- на X Международной научно-практической конференции «Образовательная среда сегодня и завтра» (г. Москва, 2015 г.);

- на VII Международной научно-практической конференции «Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (г. Саратов, 2016 г.);
- на VI Международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (г. Саратов, 2017 г.);
- на Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (Москва, 2018 г.);
- на ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова (2003–2019 гг.).

Основные положения диссертации отражены в 96 работах, в том числе: 22 статьи в рецензируемых научных журналах, 10 статей в изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus, одна монография, 9 патентов на изобретения и полезные модели. Общий объем публикаций составляет 39,8 печ.л., из которых 28,14 печ.л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 264 наименований, из которых 16 на иностранном языке, и 9 приложений. Материал работы изложен на 377 страницах машинописного текста, включает в себя 172 рисунка и 39 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснованы актуальность решаемой проблемы, научная новизна, практическая ценность, приводятся данные о реализации и апробации результатов, сформулированы научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе «Состояние проблемы и направления совершенствования и возможности использования ЛЭМД-приводов в технологиях АПК»** оценены преимущества и конкурентность применения ЛЭМД-приводов в сельхозпроизводстве и на предприятиях АПК. Показано, что для технического упрощения, удешевления, ресурсосбережения и выполнения требований экологии перспективными являются ЛЭМД-приводы. Сопоставлены свойства и уточнены преимущества использования ударных и безударных ЛЭМД-приводов для неторцевой забивки продольно-неустойчивых стержневых элементов, кормораздаточных транспортеров, клипсования упаковки сельхозпродукции, сводообрушения, шприцевания колбасного фарша и другого назначения. Кратко оценены достигнутый уровень и показатели электромагнитных приводов и машин различного назначения.

Обобщенная структурная схема (рисунок 1), на которой представлена совокупность взаимодействующих функциональных элементов ЛЭМД-привода, позволяет оценить достигнутый уровень и определить задачи по созданию или совершенствованию таких приводов для использования на предприятиях и в технологиях АПК.

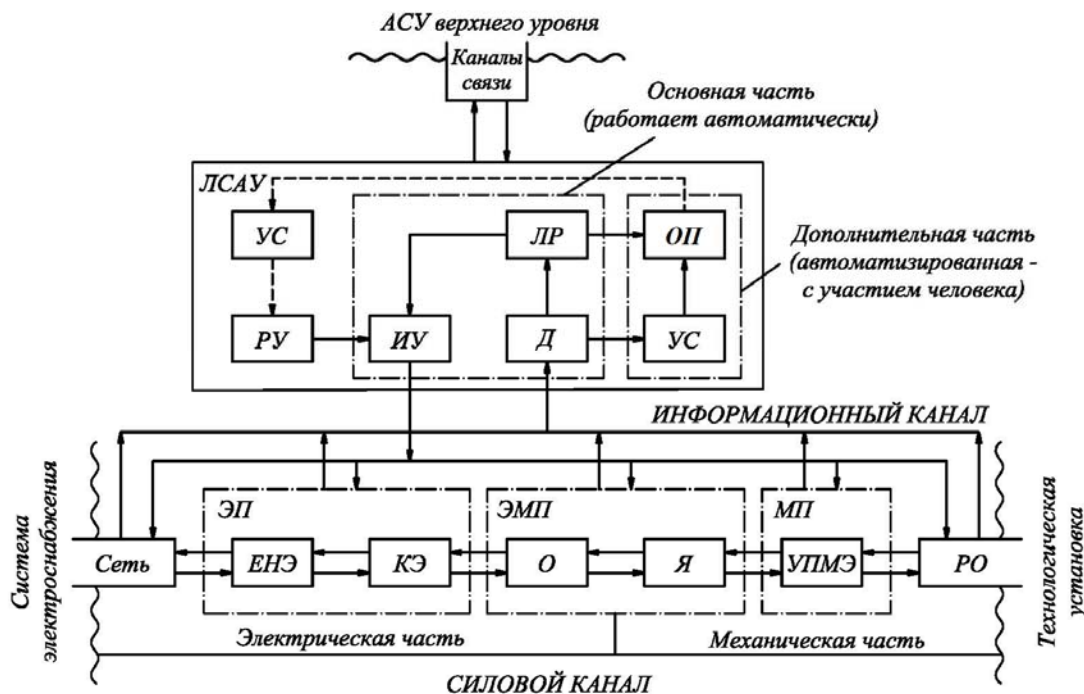


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ЛЭМД-привода: ЭП – электрический преобразователь; ЭМП – электромеханический преобразователь; МП – механический преобразователь; ЕНЭ – емкостной накопитель энергии; КЭ – коммутационный элемент; О – обмотка двигателя; Я – якорь; УПМЭ – устройство передачи механической энергии; РО – рабочий орган; ЛСАУ – локальная система автоматического управления; Д – датчик; УС – устройство связи и сопряжения; ОП – оператор; ЛР – локальный регулятор; РУ – ручное управление; ИУ – исполнительное устройство; АСУ – автоматизированная система управления

Во второй главе «Теоретическое обоснование повышения функциональности магнитных систем и снижения нагрева электромеханических преобразователей ЛЭМД-приводов» дано обоснование новой магнитной системы линейного электромагнитного двигателя, оказывающей значительное влияние на конструкцию и параметры машины. Сопоставлением результатов показана предпочтительность применения цилиндрических броневых электромагнитных двигателей в качестве привода ударных и безударных машин.

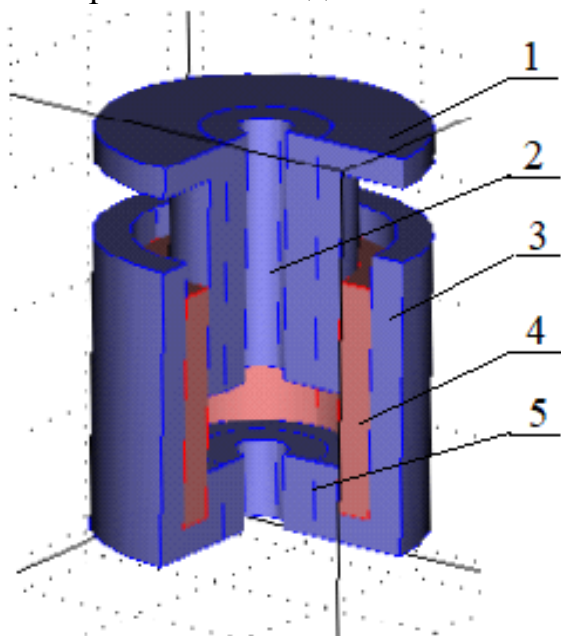


Рисунок 2 – Магнитная система броневого цилиндрического ЛЭМД со сквозным осевым каналом: 1 – комбинированный якорь; 2 – осевой канал; 3 – корпус-статор; 4 – обмотка; 5 – стоп.

При этом для расширения функциональных возможностей ЛЭМД-приводов, например, для создания транспортеров, сокоотжимающих машин или машин для погружения длинных продольно-неустойчивых стержней в грунт, представляется необходимым использовать в двигателе сквозной осевой канал (рисунок 2).

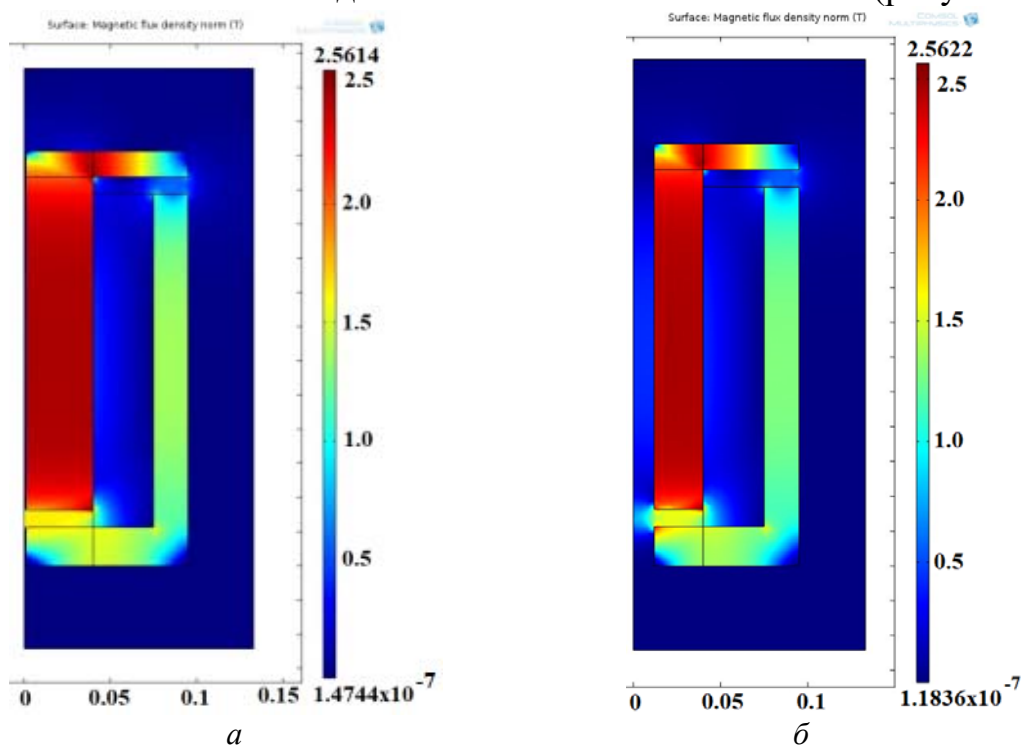


Рисунок 3 – Картины распределения магнитных полей ЛЭМД:
a – без осевого канала, *б* – с осевым каналом ($r' = 0,3$)

Цилиндрические соосные отверстия в главных элементах магнитной системы – якоре, стопе, корпусе – определяют существенные отличия традиционных двигателей и ЛЭМД со сквозным осевым каналом, поскольку дополнительные воздушные зазоры на пути магнитных потоков в двигателе влияют на магнитные свойства системы и изменяют характеристики таких ЛЭМД по сравнению с двигателями со сплошными ферромагнитными деталями.

Выявлены допустимые, с точки зрения ухудшения выходных характеристик, диапазоны варьирования поперечного сечения осевого канала относительно базисного размера r_1 втяжной части якоря ЛЭМД. При этом использованы методы имитационного моделирования, основанные на специализированных программах COMSOL Multiphysics 4.3b, Matlab, Simulink.

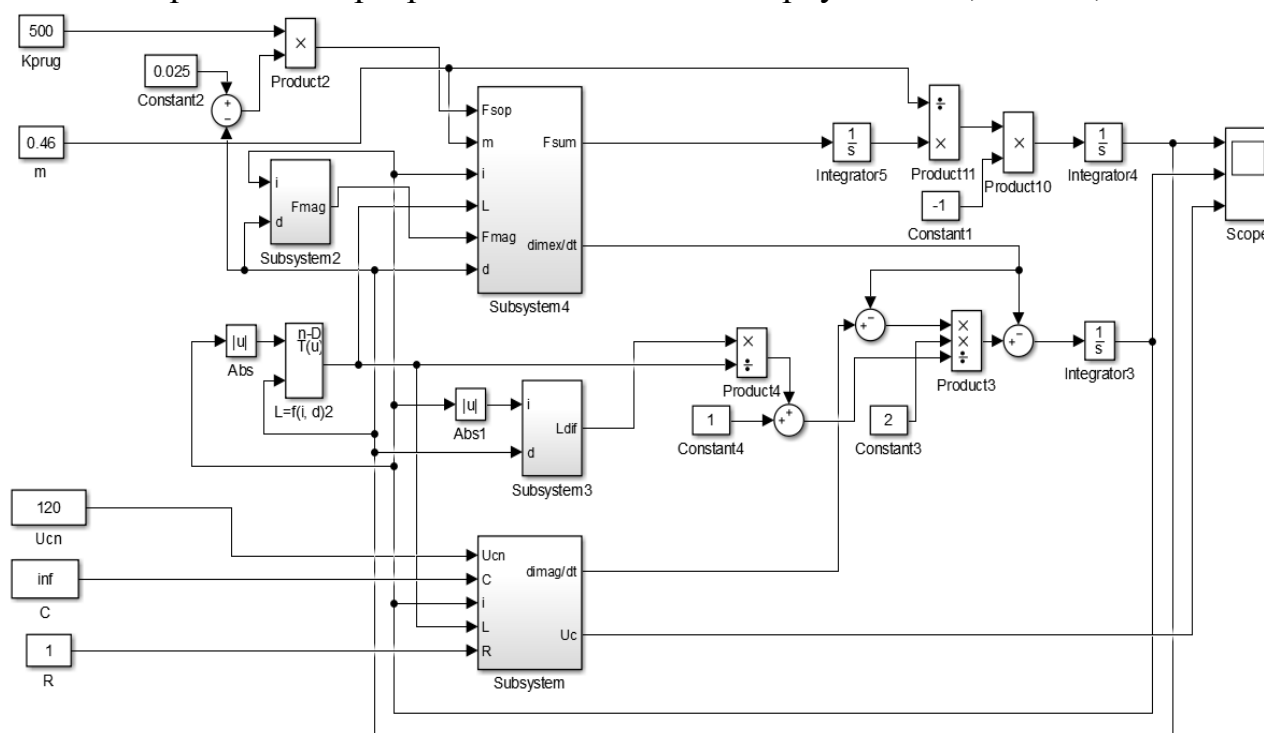


Рисунок 4 – Полная структурная схема расчетов динамики работы ЛЭМД

Картины распределения магнитного поля для принятой магнитной системы ЛЭМД представлены на рисунке 3. Выполненный анализ показал, что увеличение размера осевого канала создает насыщение якоря и ухудшает силовые показатели ЛЭМД. Для количественной оценки влияния размера осевого канала на выходные характеристики двигателя применена имитационная математическая модель ЛЭМД (рисунок 4).

Таблица 1 – Зависимость тягового усилия от величины относительного радиуса осевого канала

δ	Относительный радиус осевого канала r'									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Относительные тяговые усилия F_m^*										
δ_n	1,0	0,97	0,94	0,89	0,79	0,69	0,57	0,39	0,28	0,13
δ_k	1,0	0,99	0,94	0,90	0,82	0,73	0,61	0,48	0,34	0,18

На рисунках 5 и 6 в качестве примера показаны соответственно силовые статические характеристики $F_m = f(\delta)$ (таблица 1) при различных значениях r' и зависимость относительной интегральной работы $A_u^* = f(r')$ двигателя.

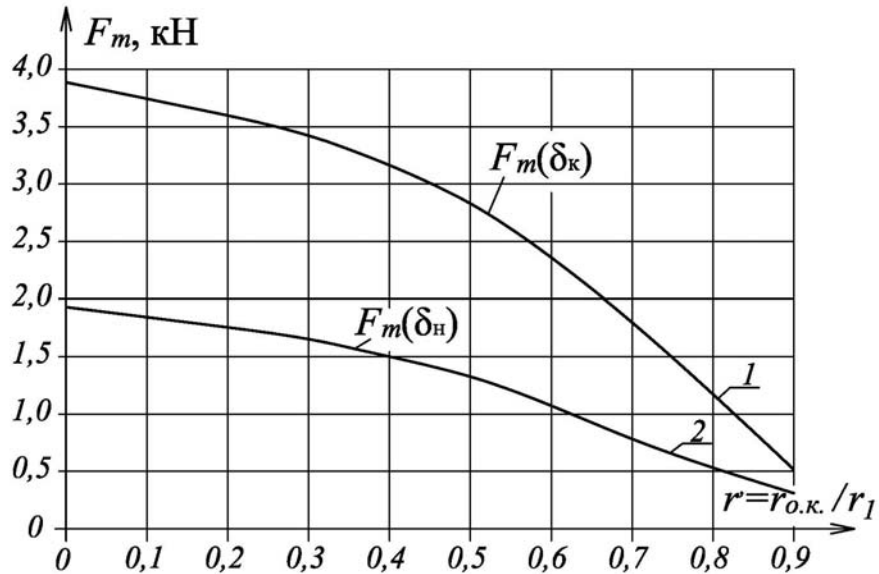


Рисунок 5 – Силовые статические характеристики $F_m = f(r')$ при $\delta_k - const$ (кривая 1) и $\delta_n - const$ (кривая 2).

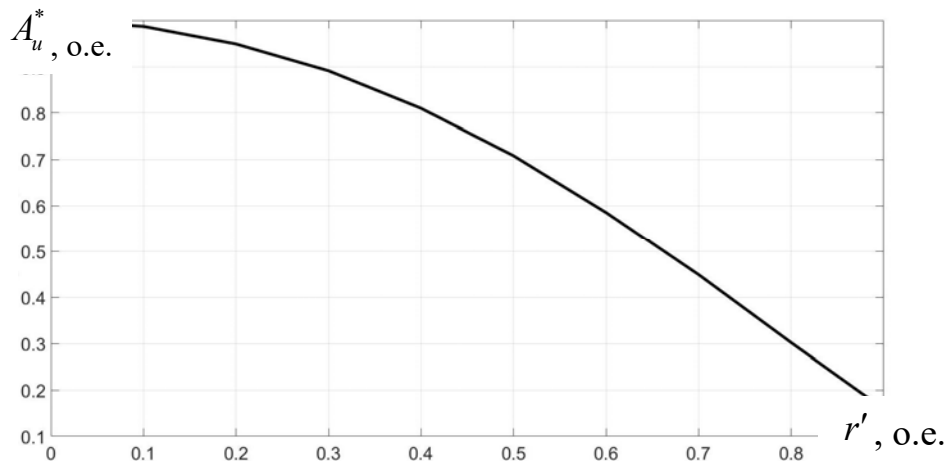


Рисунок 6 – Зависимость относительной интегральной работы $A_u^* = f(r')$.

Анализ диаграмм $F_m = f(r')$ (см. рисунок 5) и $A_u^* = f(r')$ (см. рисунок 6) показал, что сквозной осевой канал в магнитной системе ЛЭМД ухудшает начальное (см. рисунок 5, кривая 2) и конечное (см. рисунок 5, кривая 1) относительные тяговые усилия $F_m^* = \frac{F_m}{F_m^{ок}}$ (см. таблицу 1) и относительную интегральную работу $A_u^* = \frac{A_u}{A_u^{ок}}$, по сравнению с ЛЭМД без осевого канала ($A_u^{ок}$, $F_m^{ок}$, A_u , F_m – интегральная работа и тяговое усилие ЛЭМД с осевым каналом и без него соответственно). Значения F_m^* и A_u^* ухудшатся при этом в среднем не более

чем на 11 % по сравнению с магнитными системами без осевого канала, если отношение радиусов осевого канала $r_{o.к.}$ и втяжной части r_l якоря ограничивается значениями, не превышающими $r' = \frac{r_{o.к.}}{r_l} \leq 0,3$.

Имитационная модель (см. рисунок 4) позволяет оценить влияние величины относительного радиуса осевого канала r' на механическую энергию $A_{y\delta}^* = \frac{A_{y\delta}}{A_{y\delta}^{ок}}$ ($A_{y\delta}^{ок}$, $A_{y\delta}$ – механическая энергия ЛЭМД с осевым каналом и без него соответственно). Диаграмма зависимости $A_{y\delta}^* = f(r')$ показана на рисунке 7.

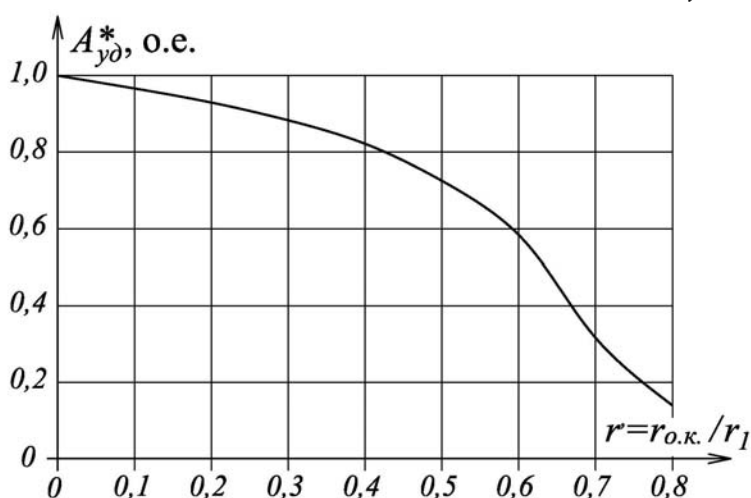


Рисунок 7 – Влияние величины относительного радиуса осевого канала на механическую энергию

Диаграмма $A_{y\delta}^* = f(r')$ (рисунок 7) показывает, что изменение осевого канала до значения $r' \leq 0,3r_l$ снижает этот показатель не более чем на 15 %. Дальнейшее увеличение r' , например, до $r' = 0,6r_l$, более чем на 40 % уменьшает механическую энергию двигателя. Показано, что использование в магнитной системе сквозного осевого канала с радиусом не более 0,3 радиуса r_l якоря хотя и ухудшает выходные показатели ЛЭМД, но представляется необходимым в приводе ударных машин, например, для погружения длинных продольно-неустойчивых стержней в грунт.

Разработаны математические модели стационарных и нестационарных тепловых процессов и оценено влияние различных факторов на нагрев элементов ЛЭМД; сформулированы рекомендации по интенсификации охлаждения двигателя с целью увеличения продолжительности работы ЛЭМД-привода.

Энергопреобразования в ЛЭМД сопровождаются необратимыми потерями, проявляющимися в виде теплоты, нарушающей тепловую однородность. Это ведет к перетоку теплоты от токоведущих частей к другим элементам ЛЭМД и во внешнюю среду.

Важным фактором, влияющим на теплопередачу, является величина охлаждающей поверхности корпуса двигателя. Оребрение поверхности корпуса ЛЭМД интенсифицирует процесс теплопередачи.

При сравнении оребренной и неоребрённой поверхностей использовали коэффициент оребрения $k_F = F_{op}/F_{zл}$, где F_{op} и $F_{zл}$ – соответственно площадь оребренной и гладкой поверхностей.

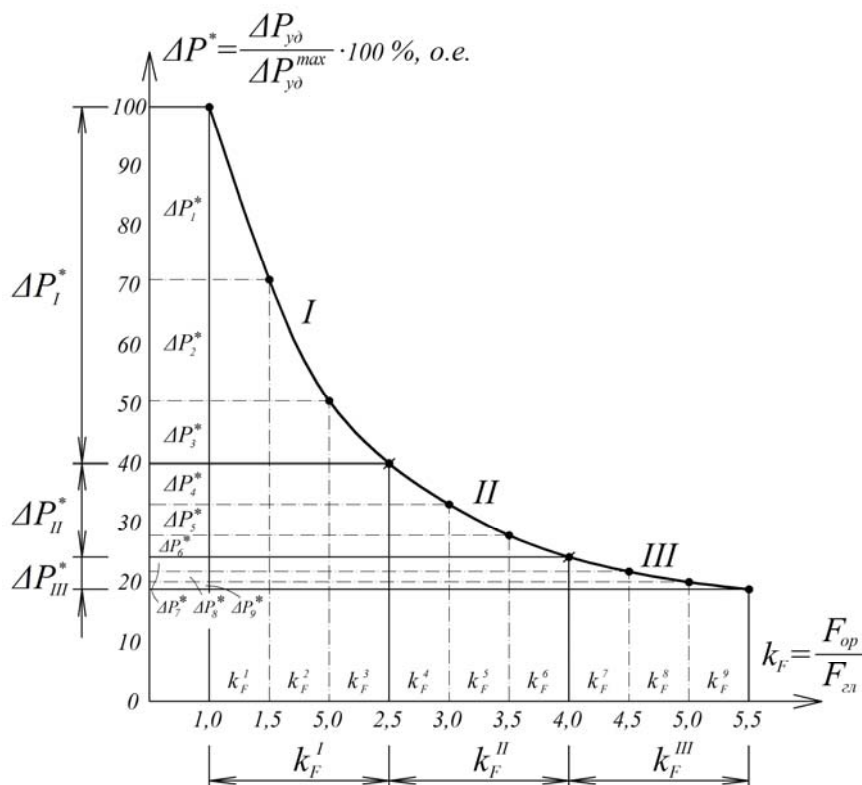


Рисунок 8 – Зависимость относительных удельных потерь ΔP^* от значения k_F

Величина k_F определяется удельными потерями в меди ЛЭМД, параметрами обмотки (сечение обмоточного провода, количество витков, размеры), формой питающего импульса тока и площадью поверхности охлаждения корпуса двигателя $F_{охл}$:

Удельные потери $\Delta P_{yд}$ на рабочем ходе якоря ЛЭМД

$$\Delta P_{yд} = \frac{R \left(\sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt} \right)^2}{F_{охл}}. \quad (1)$$

Поскольку постоянная времени T_o охлаждения обмотки более чем на порядок превосходит продолжительность единичного энергопреобразовательного цикла ЛЭМД, дискретностью тепловыделения и нагревания двигателя целесообразно пренебречь и представить взаимосвязь относительных удельных потерь в меди $\Delta P^* = (\Delta P_{yд} / \Delta P_{yд}^{max}) \cdot 100 \%$, где $\Delta P_{yд}^{max}$ – удельные потери при $k_F = 1$ (без оребрения), и коэффициента оребрения k_F в виде диаграммы $P^* = f(k_F)$ (рисунок 8).

При сравнении участков диаграммы учитывали средние значения коэффициента передачи k_{cp} на интервалах

$$\left. \begin{aligned} I - k_F &= 1,0 \dots 2,5; \\ II - k_F &= 2,5 \dots 4,0; \\ III - k_F &= 4,0 \dots 5,5; \end{aligned} \right\} \\
 k_{cp} = \frac{\sum k_i}{i}, \quad (2)$$

где k_i – коэффициент передачи i -го участка диаграммы $P^* = f(k_F)$.

$$\left. \begin{aligned} k_{cp}^I &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_1^*}{\Delta k_F^1} + \frac{\Delta P_2^*}{\Delta k_F^2} + \frac{\Delta P_3^*}{\Delta k_F^3} \right); \\ k_{cp}^{II} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_4^*}{\Delta k_F^4} + \frac{\Delta P_5^*}{\Delta k_F^5} + \frac{\Delta P_6^*}{\Delta k_F^6} \right); \\ k_{cp}^{III} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_7^*}{\Delta k_F^7} + \frac{\Delta P_8^*}{\Delta k_F^8} + \frac{\Delta P_9^*}{\Delta k_F^9} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где k_{cp}^I , k_{cp}^{II} , k_{cp}^{III} – коэффициенты передачи соответственно I , II и III участков, Δk_F – приращение коэффициента оребрения; ΔP^* – приращение относительных удельных потерь.

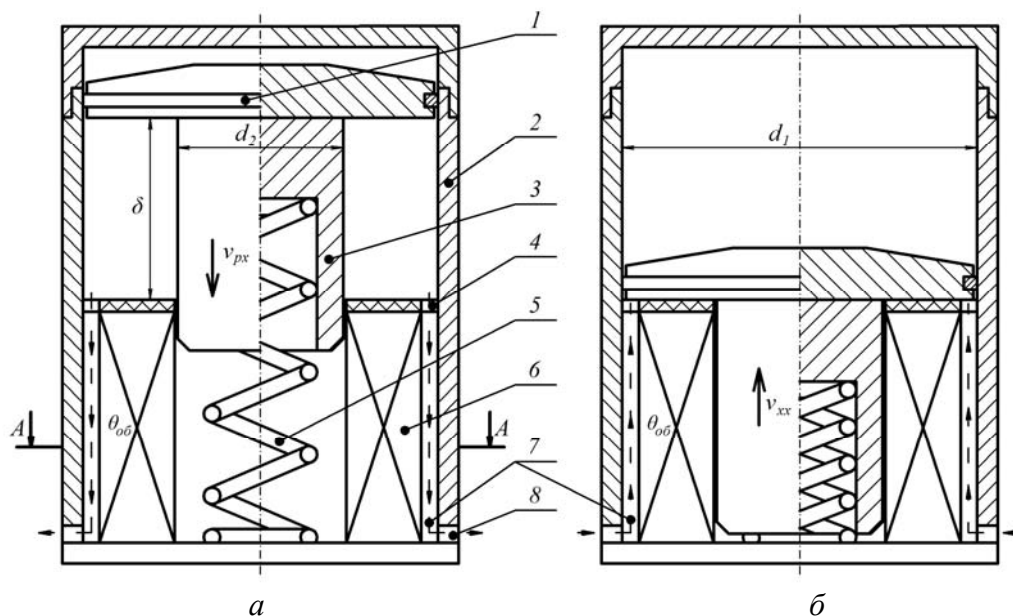


Рисунок 9 – Конструктивные схемы ЛЭМД с самовентилицией:
 а – рабочий ход; б – холостой ход

Таким образом, учетом (3) имеем

$$k_{cp}^I \approx 3,64 k_{cp}^{II} \approx 8 k_{cp}^{III}. \quad (4)$$

При создании и совершенствовании ЛЭМД-приводов с жесткими ограничениями массы устройства, например, для переносных ударных приводов,

допустимо увеличение охлаждающей поверхности ЛЭМД за счет оребрения двигателя до значений $k_F = 2,5$. Увеличение в диапазоне $k_F = 2,5 \dots 4,0$ приводит к снижению относительных удельных потерь не более чем на 15 % и представляет интерес для стационарных ЛЭМД-приводов. Дальнейшее повышение $k_F = 4,0 \dots 5,5$ нецелесообразно ввиду значительного увеличения металлоемкости изделий.

Повышенное значение ударной мощности ЛЭМД-приводов с интенсивным потреблением электроэнергии, например, машин для погружения металлических стержней в грунт, обеспечивается форсированным потреблением энергии от аккумуляторов или емкостных накопителей. При сравнительно низком напряжении эти источники отдают ЛЭМД значительные токи на интервале рабочего цикла. Величина соотношения между потерями и полезной энергией машины существенна, что ограничивает возможности создания на базе ЛЭМД с естественным охлаждением частотударных машин с продолжительным режимом работы. Таким образом, интенсификация процесса охлаждения ЛЭМД таких машин представляется необходимой.

На рисунках 9, 10 показаны конструктивные схемы ЛЭМД с самовентилиацией, обеспечивающие охлаждение токоведущих частей двигателя (обмотки) через вентиляционные каналы.

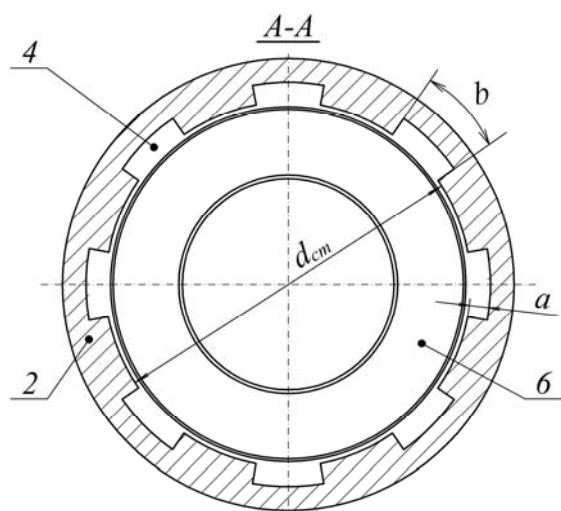


Рисунок 10 – Сечение ЛЭМД с вентиляционными каналами

Побуждаемые на рабочем ходе (см. рисунок 9, а) комбинированным якорем 3 с компрессионным кольцом 1 воздушные потоки 7, движутся по аксиальным каналам 4 (см. рисунок 10), охлаждаются обмотку 6 и выходят наружу через вентиляционные отверстия 8. На холостом ходе (см. рисунок 9, б) якорь 3 перемещается пружиной 5 в верхнюю часть корпуса 2. При этом наружный воздух поступает через отверстия 8 и, проходя по вентиляционным каналам, охлаждает обмотку 6, а при следующем рабочем ходе удаляется наружу.

Важным для оценки теплового состояния ЛЭМД является определение в зоне охлаждающего канала коэффициента теплоотдачи $\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_s}$, где λ –

коэффициент теплопроводности рабочей среды, Вт/м·°С; $d_s = 4S/\Pi$ – гидравлический или эквивалентный диаметр сечения входного канала, м; Nu – критерий Нуссельта;

$S = \frac{\pi a b (d_{cm} + a)}{(d_{cm} + 2a)}$ – площадь поперечного сечения канала, м²;

$\Pi = 2a + b \left(1 + \frac{1}{d_{cm} + 2a} \right)$ – суммарная длина линий, ограничивающих сечение, м;

a – глубина паза, м; b – ширина паза по дуге, м; d_{cm} – внутренний диаметр статора (рисунок 10).

Объёмный расход Q_6 воздуха для ЛЭМД с самовентиляцией определяется изменением объема, ограниченного поверхностью якоря 3 с компрессионным кольцом 1, внутренней поверхностью статора 2 и частью поверхности обмотки 6 в каналах 4, отнесенного к продолжительности соответственно рабочего t_{px} и холостого хода t_{xx} якоря 3. При этом утечкой воздуха через компрессионное кольцо 1 целесообразно пренебречь.

$$Q_6^{px} = \frac{\pi \delta}{4 t_{px}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (5)$$

$$Q_6^{xx} = \frac{\pi \delta}{4 t_{xx}} (d_1^2 - d_2^2), \quad (6)$$

где Q_6^{px} , Q_6^{xx} – объёмный расход воздуха при рабочем и холостом ходе соответственно, м³/с; δ – величина рабочего хода якоря, м; d_1 – внутренний диаметр статора в надобмоточном пространстве, м; d_2 – диаметр якоря, м.

С учетом выражений (5) и (6) коэффициенты теплоотдачи при рабочем α_{px} или холостом α_{xx} ходе якоря ЛЭМД:

$$\alpha_{px} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left(\frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left(\frac{\delta (d_1^2 - d_2^2)}{t_{px} \nu} \right)^{0,8} \cdot \left(2a + b \left(1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (7)$$

$$\alpha_{xx} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left(\frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left(\frac{\delta (d_1^2 - d_2^2)}{t_{xx} \nu} \right)^{0,8} \cdot \left(2a + b \left(1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}. \quad (8)$$

Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи ЛЭМД при рабочем α_{px} или холостом α_{xx} ходе якоря, определяемых глубиной вентиляционного паза a относительно толщины статора $a^* = a/\delta_{cm}$ и шириной паза b относительно длины окружности статора $b^* = b/l_{cm}$, представлены на рисунке 11.

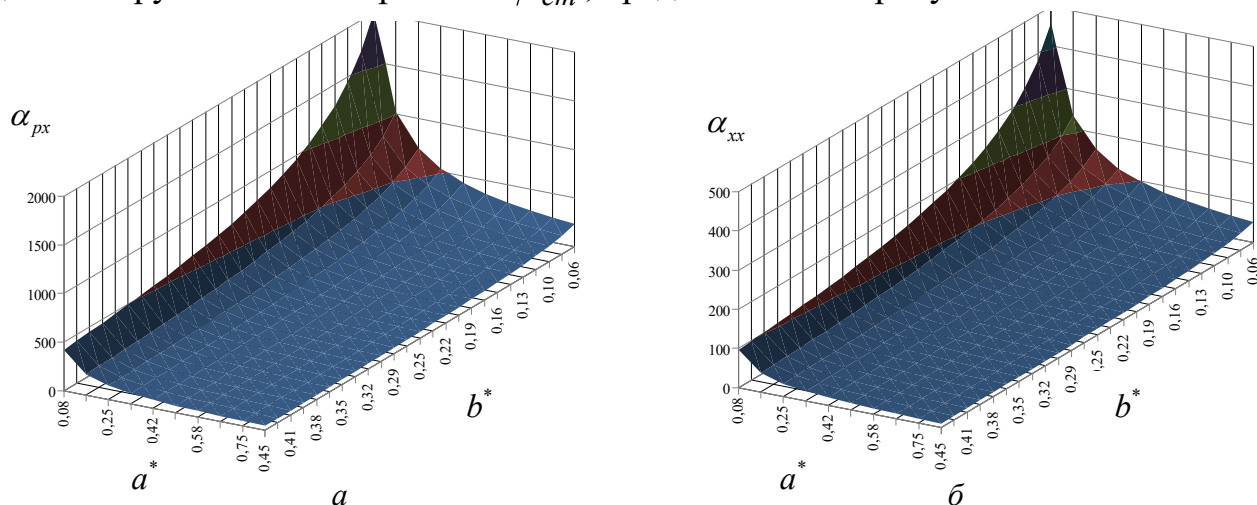


Рисунок 11 – Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи от геометрических факторов: при рабочем (а) и холостом (б) ходе якоря.

Наибольшие значения α_{px} и α_{xx} достигаются при $a^* < 0,17$ и $b^* < 0,25$. При больших значениях a^* и b^* уменьшается сечение магнитопровода, происходит глубокое насыщение статора и снижение энергетических показателей ЛЭМД.

Для количественной оценки влияния вентиляционных каналов на тепловой режим ЛЭМД проведены сравнения тепловых сопротивлений двигателя с самовентиляцией и без нее, принятого за базисный.

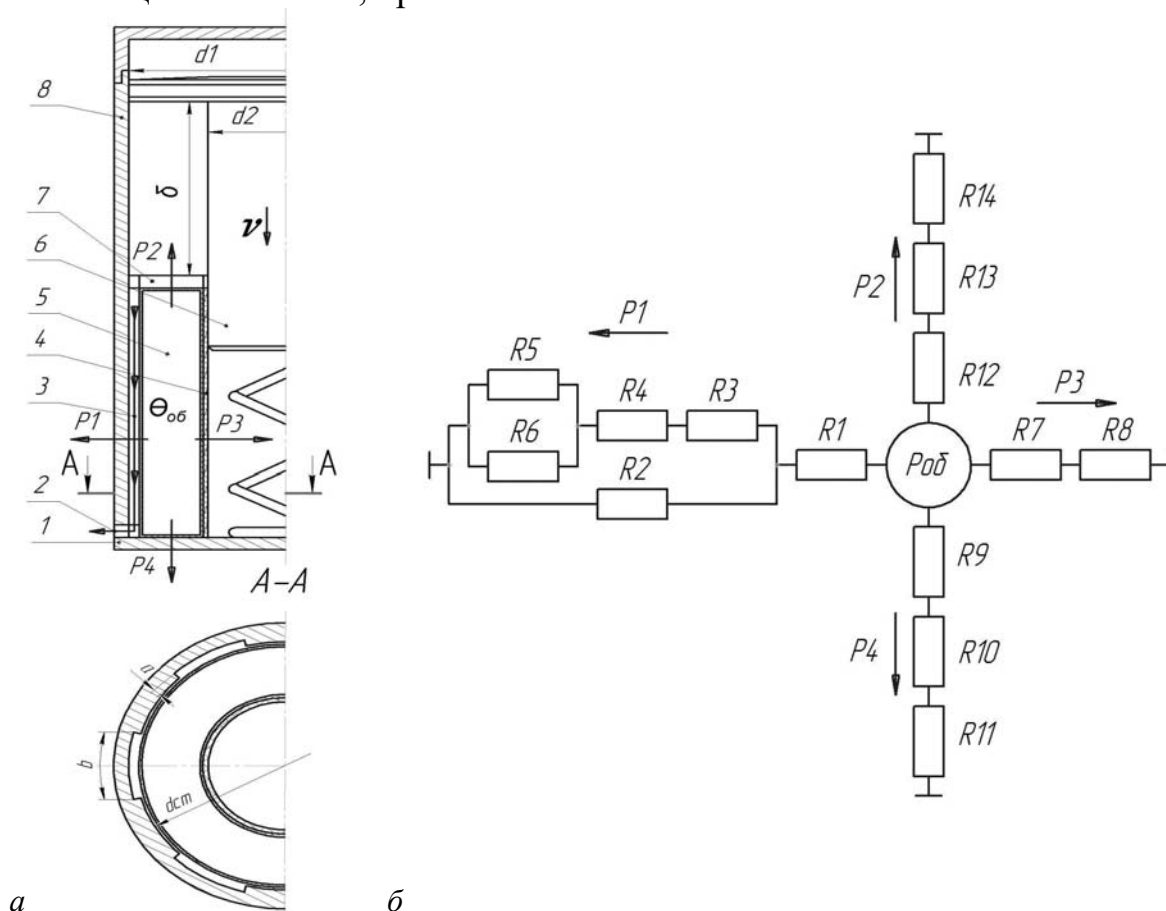


Рисунок 12 – Конструктивная схема линейного электромагнитного двигателя с самовентиляцией (а) и тепловая схема замещения (б): 1 – нижняя крышка; 2 – вентиляционные отверстия; 3 – вентиляционные каналы; 4 – каркас обмотки; 5 – обмотка; 6 – комбинированный якорь; 7 – прокладка; 8 – корпус

Учитывая, что площадь торцевых частей $S_{тор}$ обмотки мала по сравнению с ее боковой поверхностью $S_{бок}$ ($S_{тор} \leq 0,01 S_{бок}$), потоками P_2 и P_4 можно пренебречь, а наличие изоляционного материала каркаса 4 позволяет пренебречь малым потоком P_3 (рисунок 12, а). Так как у базисного ЛЭМД отсутствуют вентиляционные каналы, то его тепловая схема замещения с учетом упрощений имеет вид, показанный на рисунке 12, б.

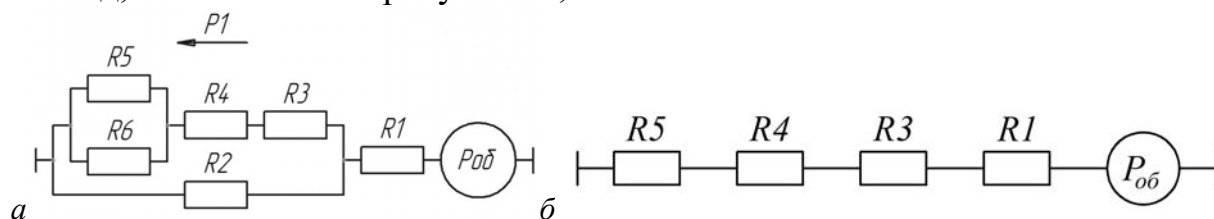


Рисунок 13 – Расчетная тепловая схема замещения ЛЭМД с самовентиляцией (а) и базисного ЛЭМД (б)

С учетом рисунка 13 были определены эквивалентные тепловые сопротивления ЛЭМД с самовентиляцией $R_{\text{экв}}^1$ и базисного двигателя $R_{\text{экв}}^2$:

$$R_{\text{экв}}^1 = R1 + \frac{R2 \left(R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6} \right)}{R2 + R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6}}, \quad (9)$$

$$R_{\text{экв}}^2 = R1 + R3 + R4 + R5. \quad (10)$$

Проведенные оценки позволили определить значения $R_{\text{экв}}^1$ и $R_{\text{экв}}^2$:

$$\frac{R_{\text{экв}}^2 - R_{\text{экв}}^1}{R_{\text{экв}}^2} \cdot 100 \% \approx 35 \%. \quad (11)$$

Таким образом, применение в ЛЭМД-приводе самовентиляции эквивалентно снижению теплового сопротивления двигателя на 35 % и позволяет увеличить продолжительность работы при форсированном потреблении электроэнергии.

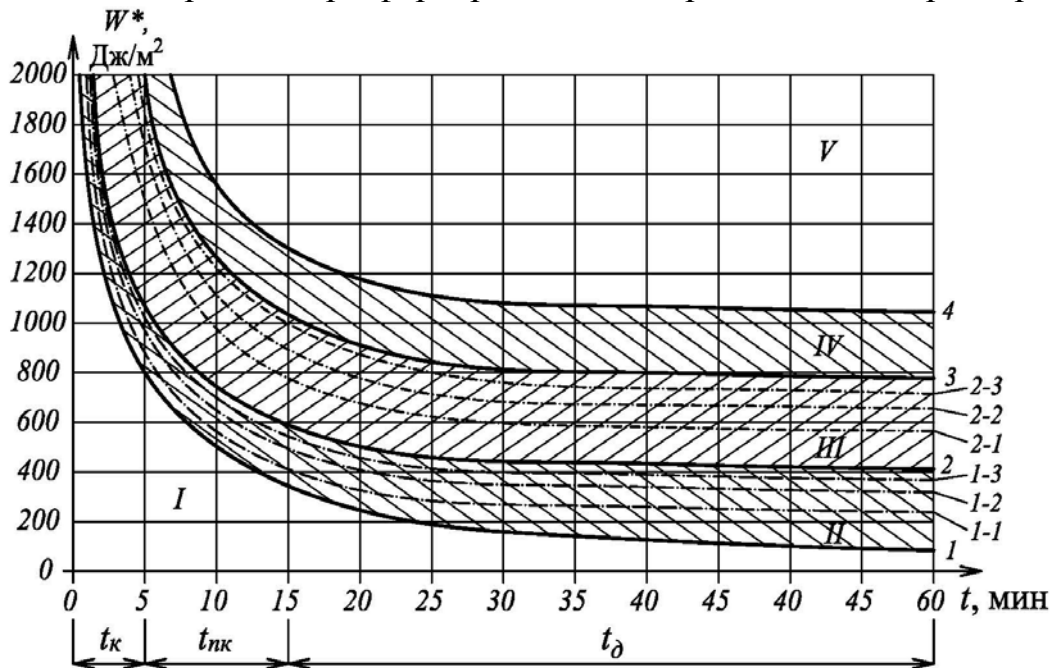


Рисунок 14 – Диаграмма для выбора системы охлаждения машины с ЛЭМД

Результаты исследования стационарных и нестационарных тепловых процессов в ЛЭМД представлены диаграммой (рисунок 14), позволяющей осуществлять выбор рационального исполнения системы охлаждения, что упрощает проектирование ударных и безударных электромагнитных машин.

На выбор системы охлаждения влияют: режим работы ЛЭМД-привода – кратковременный t_k , повторно-кратковременный $t_{нк}$, продолжительный t_d ; значение цикловой потребляемой энергии; площадь теплоотдающей поверхности ЛЭМД. Кривые 1...4 на диаграмме (см. рисунок 14) делят совокупность значений на подобласти I – V, определяющие предпочтительность системы охлаждения:

- подобласть I – ЛЭМД с естественным охлаждением без увеличения площади теплоотдающей поверхности;

- подобласть II – ЛЭМД с естественным охлаждением с развитой теплоотдающей поверхностью – разделена кривыми 1-1...1-3, которые соответствуют различным значениям коэффициента оребрения k_F (1-1 при $k_F=2$, 1-2 при $k_F=4$, 1-3 при $k_F=8$);
- подобласть III – ЛЭМД с самовентиляцией – разделена кривыми 2-1...2-3, которые соответствуют различным значениям коэффициента оребрения k_F (2-1 при $k_F=2$, 2-2 при $k_F=4$, 2-3 при $k_F=8$);
- подобласть IV – ЛЭМД с дополнительным вентилятором для охлаждения;
- подобласть V – определяет совокупность конструктивных и режимных параметров ЛЭМД с большими потерями и низким КПД.

В третьей главе «Компоновочные схемы рабочих машин с ЛЭМД-приводами» предложены новые устройства вывода и передачи механической энергии «двигатель – исполнительный орган», встраиваемые в конструкцию ЛЭМД.

Для расширения области эффективного применения ЛЭМД-привода предложен зажимной механизм со сферическими (рисунок 15), взамен острооребранных конусных, поперечно-заклинивающими на рабочем ходе δ в осевом канале инструмент или рабочий орган элементами, свободно интегрирующийся в моноконструкцию ЛЭМД-привода.

На рисунке 15 показана схема сил для случая, когда комбинированный якорь 1 под действием электромагнитной силы совершает рабочий ход. При этом сферические элементы 3 заклинивают исполнительный орган 2 и сообщают ему поступательное движение от якоря 1.

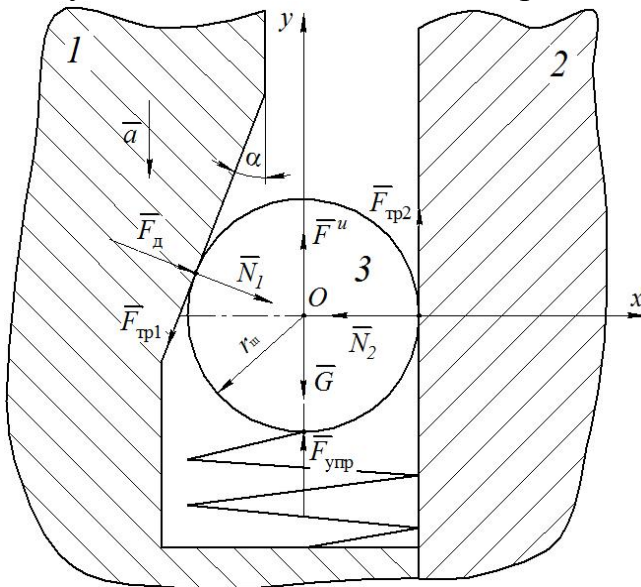


Рисунок 15 – Расчетная схема сил зажимного механизма со сферическими заклинивающими элементами:
1 – комбинированный якорь;
2 – исполнительный орган;
3 – сферический заклинивающий элемент.

Совокупность действующих в зажимном механизме сил имеет вид: сила тяжести $G = m_{ш}g$; сила инерции $F^u = m_{ш}a$; сила упругости пружины $F_{упр} = c\Delta l$; нормальная сила в сочленении «якорь – шарик» F_d ; реакции шарика и исполнительного органа – соответственно N_1 и N_2 ; сила трения качения в сочленении «якорь – шарик» $F_{тр1} = N_1 \frac{k}{r_{ш}}$ и «шарик – исполнительный орган»

$F_{mp2} = N_2 \frac{k}{r_{ш}}$, где $m_{ш}$ – масса шарика; a – ускорение якоря, шарика; c – коэффициент жесткости пружины; k – коэффициент трения качения, $r_{ш}$ – радиус шарика.

Нормальная сила в сочленении «якорь – шарик» F_{δ} определяется тяговым усилием $F_m = F_{\delta} = 0,5i^2 \frac{dL}{d\delta}$ якоря на рабочем ходе под действием электромагнитной силы, где i – сила тока в обмотке на рабочем ходе якоря, δ – величина рабочего зазора, L – индуктивность обмотки.

Мощность, передаваемая якорем исполнительному органу на рабочем ходе:

$$N_{пол} = F_{\delta} v_{p.o.}, \quad (12)$$

где $v_{p.o.}$ – средняя скорость перемещения исполнительного органа в рабочем цикле; $F_{\delta} = bF_{mp2}$ – движущая сила исполнительного органа; b – количество шариков в зажимном механизме ($b = 3$).

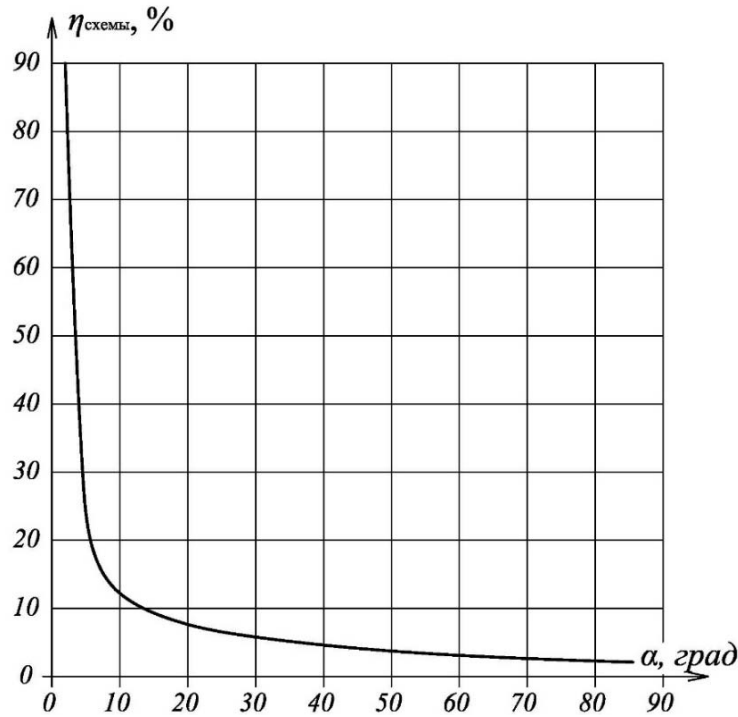


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента передачи зажимного механизма от угла α конусной проточки якоря.

С учетом выражения (12) и схемы сил (см. рисунок 15) механическая мощность, передаваемая механизмом инструменту привода:

$$N_{пол} = v_{p.o.} \left[0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \cos \alpha + \frac{m_{ш}(a-g) + c\Delta l + 0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \left(\frac{k}{r_{ш}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{ш}} \right)^2 + 1 \right)} \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{ш}} \sin \alpha \right) \right] \frac{k}{r_{ш}} b. \quad (13)$$

Коэффициент передачи предлагаемого зажимного устройства со сферическими заклинивающими элементами:

$$\eta_{\text{схемы}} = \frac{b \left[0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \cos \alpha + \frac{m_{\text{ш}}(a-g) + c\Delta l + 0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \right)^2 + 1 \right)} \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{\text{ш}}} \sin \alpha \right) \right] \frac{k}{r_{\text{ш}}}}{0,5i^2 \frac{dl}{d\delta}}. \quad (14)$$

Таким образом, на величину коэффициента передачи устройства влияют количество сферических элементов зажимного механизма, их масса, размер и физико-механические свойства, а также угол α конусной проточки якоря (рисунок 16).

Анализ характеристики (см. рисунок 16) свидетельствует, что коэффициент передачи зависит от значения угла α . Показано, что для повышения эффективности следует принимать минимальное значение этого угла. Например, при $\alpha=11^\circ$, коэффициент передачи устройства 10,84 %.

Предложенный зажимной механизм со сферическими заклинивающими элементами позволил создать ЛЭМД-привод для однонаправленного или попеременного двунаправленного перемещения S инструмента, многократно $n\delta$, $n=1,2,\dots$, превышающего рабочий зазор и ход δ якоря двигателя $S=n\delta$; при этом инструмент может быть в виде троса или гладкого твердого цилиндрического штока (рисунок 17).

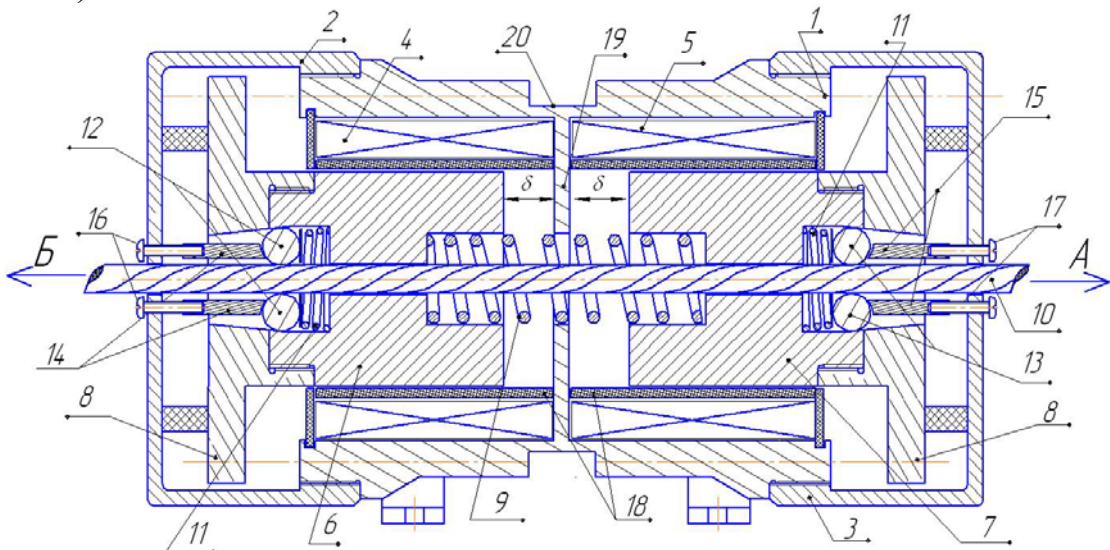


Рисунок 17 – Конструкция реверсивного ЛЭМД со сферическими заклинивающими элементами: 1 – цилиндрический статор; 2, 3 – крышки; 4, 5 – обмотки; 6, 7 – комбинированный якорь; 8 – дисковая часть якоря; 9 – возвратная пружина; 10 – исполнительный орган; 11 – пружины; 12, 13 – сферические заклинивающие элементы; 14, 15 – шток для фиксации положения сферических элементов; 16, 17 – регулировочные болты; 18 – направляющие; 19 – полюс-шайба; 20 – кольцевой прямоугольный паз.

Рассмотрены особенности взаимодействия ЛЭМД и рабочего инструмента. При обесточенных обмотках 4, 5 оба якоря 6 и 7 поджаты к штокам 14 и 15 с регулировочными болтами 16, и 17 пружиной 9. При необходимости перемещения рабочего органа 10, например, в направлении А, на обмотку 4 подают напряжение от источника питания. Якорь 6 втягивается в обмотку 4 под

действием электромагнитной силы, перемещаясь на величину δ (рабочий ход) и сжимая пружину 9. Незначительные взаимные осевые перемещения шариковых зажимов 12, контактирующих по конусной поверхности проточек в якоре, создают значительные радиальные усилия, надежно зажимающие рабочий орган 10, который перемещается на величину δ хода комбинированного якоря 6. При этом штоки 15 создают усилия на стопорные элементы 13 радиально от рабочего органа 10, исключая его заклинивание.

По окончании питающего импульса якорь 6 возвращается пружиной 9 в исходное положение. При возвращении подпружиненные пружиной 11 стопорные элементы 12 отпускают рабочий орган. Далее циклы повторяются.

В четвертой главе «Электрические преобразователи ЛЭМД-приводов» рассмотрены принципы построения и разработаны схемы электрических преобразователей, обеспечивающих адаптацию выходных параметров ударных и безударных ЛЭМД-приводов к изменению нагрузки.

Необходимость совершенствования электромеханических систем с линейными электромагнитными двигателями и аккумуляторным питанием для реализации, например, ударных операций при погружении стержневых элементов в грунт, требует эффективного использования энергозапаса аккумуляторов (АИП) для увеличения продолжительности работы системы без подзарядки источника. При определении возможности реализации системы с автоматической коррекцией потребляемой от аккумуляторов электроэнергии необходим учет свойств нагрузки – грунта.

Величина механической энергии $A_{y\delta} = 0,5m_{\delta}v_{y\delta}^2$, определяемая линейной скоростью $v_{y\delta}$ якоря-бойка в момент удара по стержню, должна обеспечивать последовательные заглублиения ΔY и погружение стержня на заданную глубину Y и зависит от массогабаритных характеристик стержня и свойств грунта:

$$A_{y\delta} = \frac{S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y}{\eta - \frac{\rho \cdot \sin \alpha \cdot S \cdot \Delta Y}{m_c + m_{\delta}}}, \quad (15)$$

где S – площадь поперечного сечения стержня; C_x , C_y – коэффициенты сопротивления проникновению стержня в грунт по горизонтали и вертикали соответственно; f_{mp} – коэффициент трения материала стержня о грунт; ΔY – величина заглублиения стержня за один удар; Y – суммарное заглублиение стержня перед очередным ударом; ρ – плотность грунта; α – угол заточки переднего конца стержня; η – коэффициент, учитывающий потери энергии при соударении; m_{δ} , m_c – масса бойка и стержня соответственно.

При этом величину электрической энергии $W_{эл}$, обеспечивающую значение $A_{y\delta}$, выбирают без учета заглублиения стержня в грунт с обобщенными среднестатистическими свойствами так, чтобы обеспечить верхний предел диапазона $A_{y\delta}$ и ударную мощность $P_{y\delta}$ для гарантированного погружения:

$$A_{y\delta} = \eta W_{эл} = \eta \int_0^{t_u} p(t) dt = \eta \int_0^{t_u} u(t) i(t) dt, \quad (16)$$

$$A_{y\delta} = P_{y\delta} / n = P_{y\delta}^0 t_u, \quad (17)$$

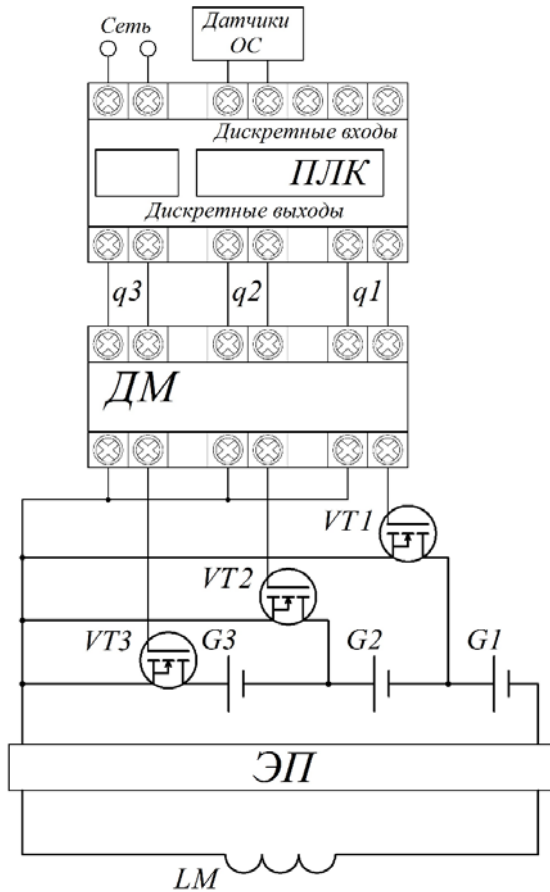


Рисунок 18 – Электрическая схема коммутации батарей АИП: $q_1...q_3$ – выходы ПЛК; ДМ – драйверная микросхема; $G_1...G_3$ – аккумуляторные батареи; LM – обмотка ЛЭМД; $VT_1...VT_3$ – полевые транзисторы MOSFET

грунта, встреча стержня с включениями и т.д.) повышает частоту ходов n якоря ЛЭМД, увеличивает частоту импульсов сигнала ОС и обеспечивает подключение к исходному набору батарей дополнительной аккумуляторной батареи. Если по мере дальнейшего заглубления происходит последующее возрастание n подключается очередная (последующие) аккумуляторная батарея.

Для ПЛК обоснован алгоритм коммутации: если $n < n_1 - U_{ЛЭМД}^{LOW} = U_{G_1}$; если $n_2 > n > n_1 - U_{ЛЭМД} = U_{G_1} + U_{G_2}$; если $n > n_2 - U_{ЛЭМД}^{HIGH} = U_{G_1} + U_{G_2} + U_{G_3}$, где n_1 , n_2 – частота ходов якоря-бойка, задаваемая эмпирически; $U_{ЛЭМД}^{LOW}$, $U_{ЛЭМД}$, $U_{ЛЭМД}^{HIGH}$ – напряжение на зажимах АИП при подключении аккумуляторных батарей G_1 , G_2 , G_3 соответственно; U_{G_1} , U_{G_2} , U_{G_3} – напряжение первой, второй и третьей аккумуляторных батарей (см. рисунок 18).

Программирование ПЛК выполнено в среде *CoDeSys* на языке *CFC*; использована стандартная библиотека функциональных блоков, совокупность и схема соединения представлены на рисунке 19.

где η – КПД ЛЭМД; p , u , i – мгновенные мощность, напряжение, ток соответственно обмотки ЛЭМД; $t_u = t_{px} + t_{xx}$ продолжительность рабочего цикла ЛЭМД; t_{px} – продолжительность рабочего хода (срабатывания) якоря; t_{xx} – продолжительность возврата (холостого хода) якоря пружиной; P_{y0} – ударная мощность ЛЭМД; $n = 1/t_u$ частота срабатываний (частота ходов) якоря ЛЭМД, определяемая свойствами автоколебательной системы «якорь – возвратная пружина».

Однако избыток электрической и механической энергии на начальном этапе забивки приводит к перегреву обмотки, сокращает механический ресурс ЛЭМД, а при использовании аккумуляторов в качестве источника питания, – уменьшает их разрядную емкость и число забиваемых без подзарядки стержней.

Коррекция величины A_{y0} обеспечивается ступенчатым варьированием выходного напряжения АИП – изменением числа последовательно включаемых аккумуляторных батарей в источнике непосредственно в процессе забивания стержня (рисунок 18). Рассмотрен пример АИП с тремя батареями G_1 , G_2 , G_3 . Изменение условий погружения в процессе забивки (увеличение плотности

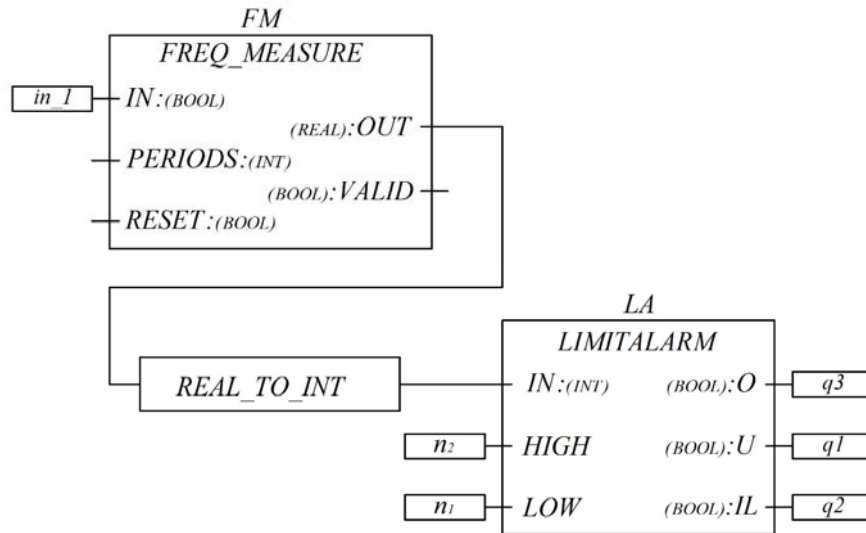


Рисунок 19 – Схема соединения функциональных блоков

На дискретный вход in_1 контроллера подаются импульсы сигнала обратной связи от датчиков положения якоря ЛЭМД ударной машины (УМ). Функциональный блок *FREQ_MEASURE* позволяет измерять усредненную частоту входного сигнала. Вход *PERIODS* используется для задания периодов для усреднения.

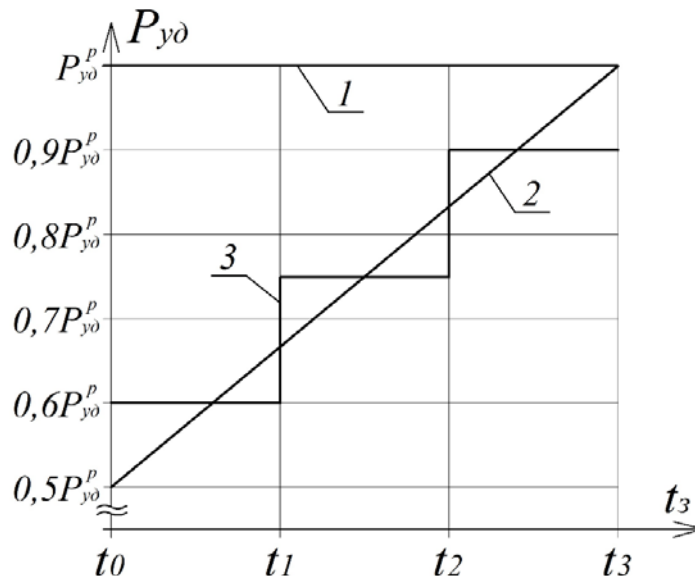


Рисунок 20 – Изменение ударной мощности $P_{y\delta}$ ЛЭМД УМ на интервале погружения стержня: 1 – характеристика $P_{y\delta}=f(t_3)$ в отсутствие коррекции; 2 – идеальная характеристика $P_{y\delta}=f(t_3)$ с бесконечным числом коммутаторов; 3 – фактическая характеристика $P_{y\delta}=f(t_3)$ системы с автокоррекцией

На рисунке 20 представлена идеализированная качественная диаграмма изменения механической мощности ЛЭМД УМ на интервале t_3 погружения стержня при реализации или отсутствии адаптивной подстройки. Если при начальном напряжении источника U_{G1} обеспечивается половинное значение механической мощности, отдаваемой ЛЭМД УМ при максимальном значении $U_{G1}+U_{G2}+U_{G3}$, и существует линейная корреляция «напряжение источника – механическая мощность ЛЭМД УМ», то в ЛЭМД-приводе с автоподстройкой при последовательном

равномерном увеличении напряжения источника на интервале t_3 можно рассчитывать на уменьшение отбираемой от источника на погружение стержня энергии на четверть.

Моделирование процесса регулирования выходной механической энергии удара $A_{y\partial}$ в зависимости от свойств нагрузки (грунта) проведено в предположении, что с увеличением плотности грунта возрастает коэффициент восстановления k и уменьшается время t_y цикла ударной машины (рисунок 21). Тогда напряжение, подаваемое на обмотку ЛЭМД будет определяться значением t_y :

$$U_{num} = \begin{cases} U_{G1} & npi \quad t_1 < t_y; \\ U_{G1} + U_{G2} & npi \quad t_2 < t_y < t_1; \\ U_{G1} + U_{G2} + U_{G3} & npi \quad t_y < t_2, \end{cases} \quad (18)$$

где t_1, t_2 – предельные значения времени цикла, определяющие настройку работы системы.

Результаты моделирования представлены в виде временных диаграмм (рисунки 22 – 25).

В начальный момент времени (при $t=0..17$ с) погружение стержневого элемента в грунт обеспечивается значением $A_{y\partial 1}$ (см. рисунок 25), при минимальном напряжении источника $U_{num1}=U_{G1}$ (см. рисунок 24). При этом коэффициент k восстановления не превышает $k_1 \leq 0,2$ (см. рисунок 23). По мере заглубления стержня величина k_1 растет и при достижении значения $k_1 > 0,2$ происходит переключение источника на напряжение $U_{num2}=U_{G1}+U_{G2}$ (рисунок 24). Энергия удара увеличивается до значения $A_{y\partial 2}$ (рисунок 25). Если коэффициент восстановления k_2 вновь уменьшится до $k_1 \leq 0,2$, то происходит изменение $U_{num1}=U_{G1}$ (рисунок 23 – рисунок 25, подобласть «а»).

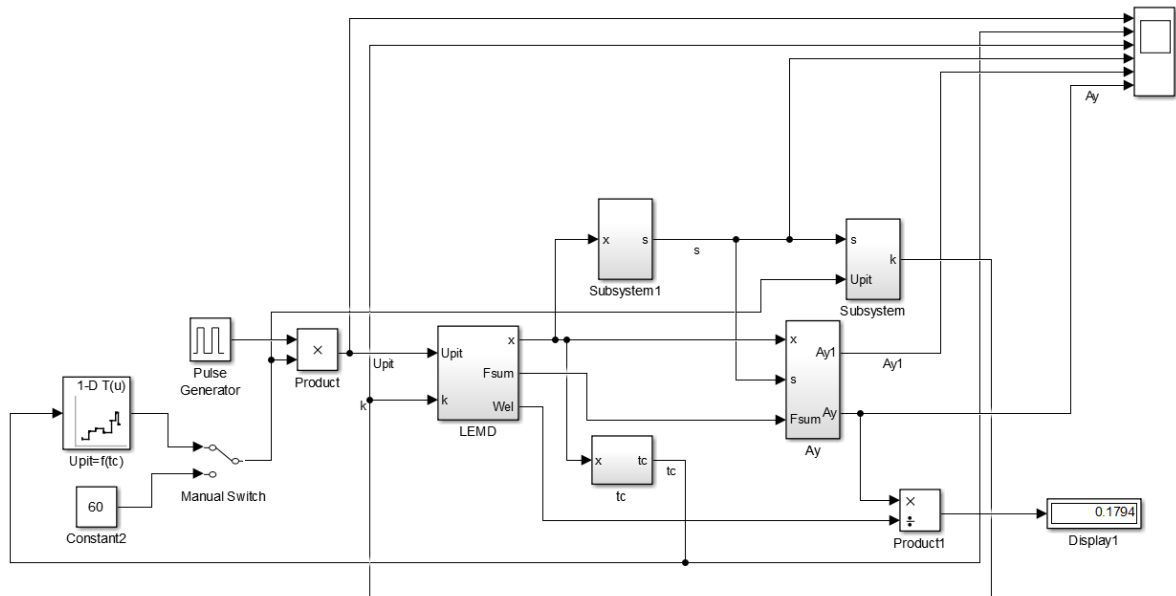


Рисунок 21 – Модель рабочих процессов ЛЭМД ударной машины с адаптацией выходной механической энергии

При $k_1 > 0,4$ (см. рисунок 23, подобласть «b») или $k_2 > 0,4$ (см. рисунок 23, подобласть «c») происходят переключения АИП $U_{num1}=U_{G1}$ и $U_{num3}=U_{G1}+U_{G2}+U_{G3}$ (см.

рисунок 24, подобласти «b» и «c»), обеспечивающие энергию $A_{y\partial 1}$ и $A_{y\partial 3}$ (см. рисунок 25, подобласти «b» и «c»). При этом значение $k_3 \leq 0,2$.

Для интервала, когда $k_3 > 0,2$ ($t > 54$ с, см. рисунок 23, подобласть «d») происходит переключение напряжения источника АИП $U_{num2} = U_{G1} + U_{G2}$ и $U_{num3} = U_{G1} + U_{G2} + U_{G3}$ (см. рисунок 24, подобласть «d»); обеспечивающего диапазон $A_{y\partial 2} - A_{y\partial 3}$ (см. рисунок 25, подобласть «d»).

Для предотвращения ложных переключений режимов АИП задается время повторного опроса датчиков обратной связи. Чем больше период опроса, тем реже будут происходить переключения батарей источника питания. Показатели регулирования при этом снижаются, что приводит к увеличению энергопотребления и ухудшению выходных показателей ЛЭМД-привода. Таким образом, изменением величины подобластей «a», «b», «c» и «d» подбираются предпочтительный режим погружения стержней на заданную глубину в грунт различной плотности.

Предварительная оценка механической работы $A_{мех}$, затрачиваемой на погружение одного стержня длиной $l = 2$ м ЛЭМД-приводом с адаптивной автоподстройкой и без нее, свидетельствует, что применение автоматической подстройки выходной энергии ЛЭМД-привода в зависимости от свойств грунта снижает избыточность энергии $A_{мех}$ в среднем на 20–28 % и является перспективной при питании ударной машины от автономных источников ограниченной мощности.

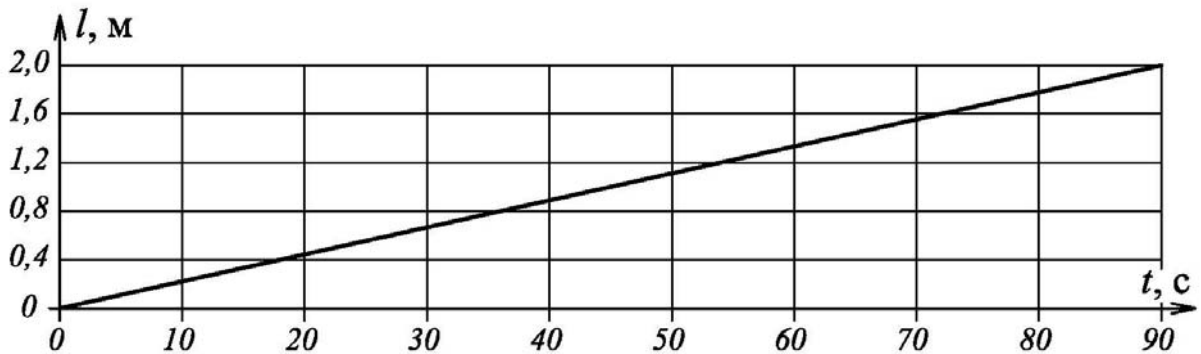


Рисунок 22 – Зависимость величины заглубления l стержневого элемента от времени $l=f(t)$

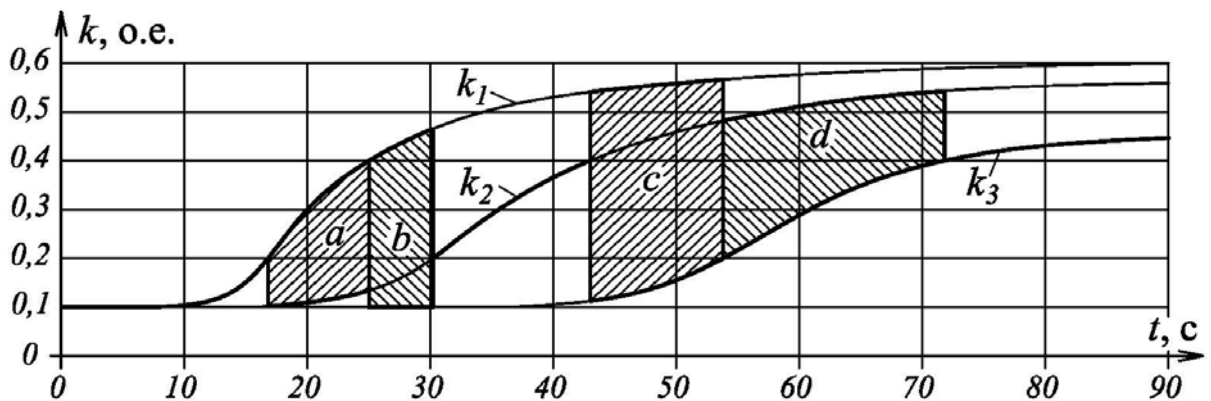
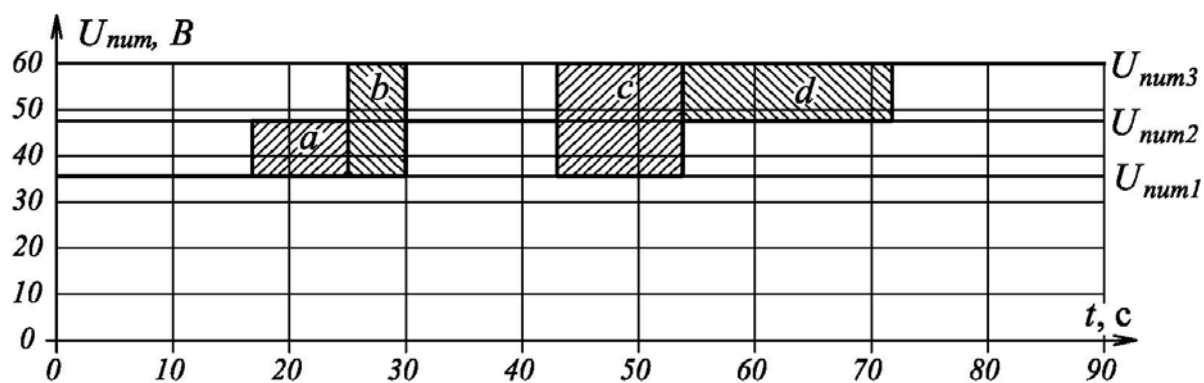
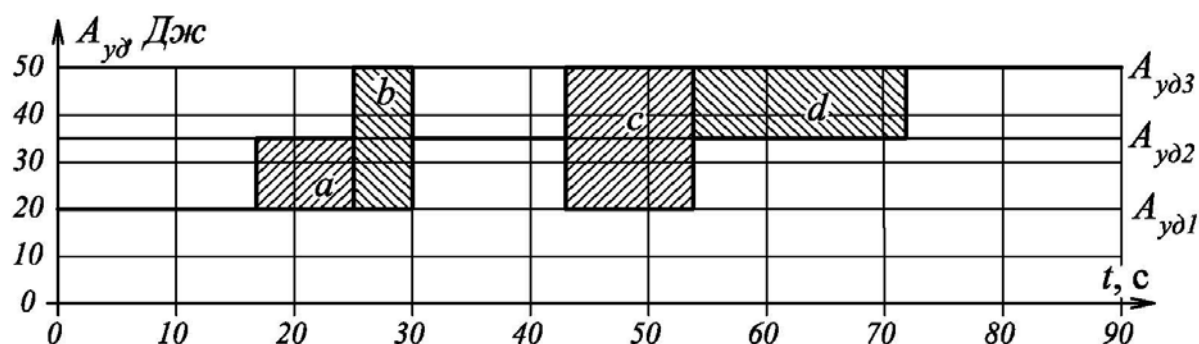


Рисунок 23 – Изменение коэффициента восстановления k во времени $k=f(t)$

Рисунок 24 – Изменение напряжения питания U_{num} во времени $U_{num}=f(t)$ Рисунок 25 – Изменение энергии удара $A_{уд}$ во времени $A_{уд}=f(t)$

В ряде процессов и операций (кормораздача, шприцевание колбасного фарша и др.) требуется обеспечить плавность рабочего хода якоря ЛЭМД, для достижения которой предложен подход к реализации автоматической коррекции выходного усилия F_m линейного электромагнитного двигателя. Функциональная схема электрического преобразователя с программируемым логическим контроллером представлена на рисунке 26.

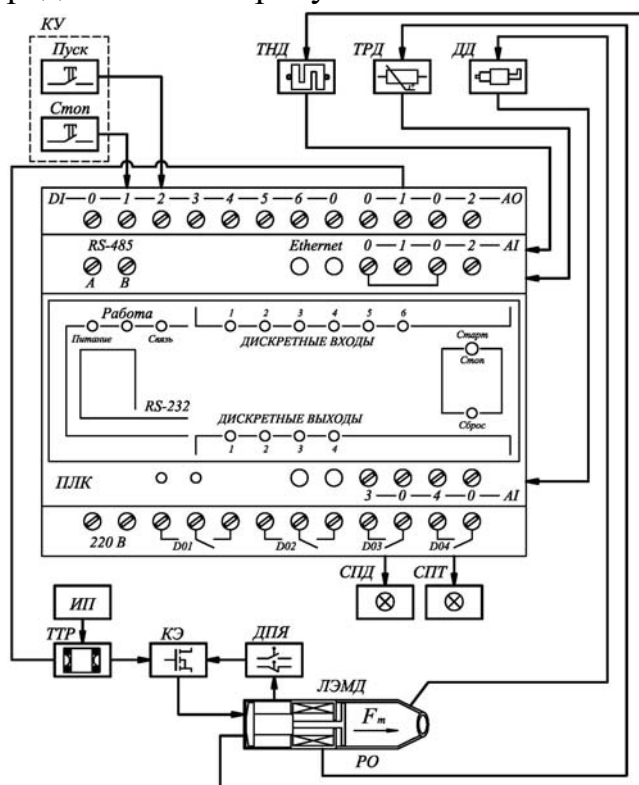


Рисунок 26 – Система автоматического управления плавным ходом якоря ЛЭМД: КУ – кнопки управления; ТНД – тензодатчик; ТРД – термодатчик; ДД – датчик давления; ИП – источник питания; ТТР – твердотельное реле; КЭ – коммутационный элемент; РО – рабочий орган; ЛЭМД – линейный электромагнитный двигатель; СПД – сигнализация превышения давления в фаршевом цилиндре; СПТ – сигнализация превышения температуры обмотки двигателя; ПЛК – программируемый логический контроллер

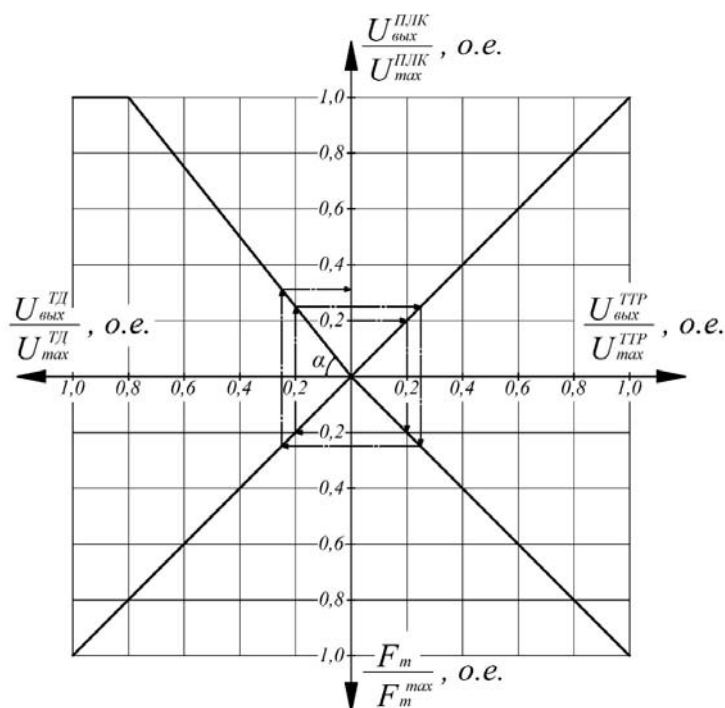


Рисунок 27 – Номограмма, поясняющая действие системы с автокоррекцией выходного тягового усилия

Автоматическая коррекция выходного тягового усилия F_m обеспечивается плавным варьированием напряжения на обмотке двигателя посредством изменения управляющего напряжения на твердотельном реле ТТР.

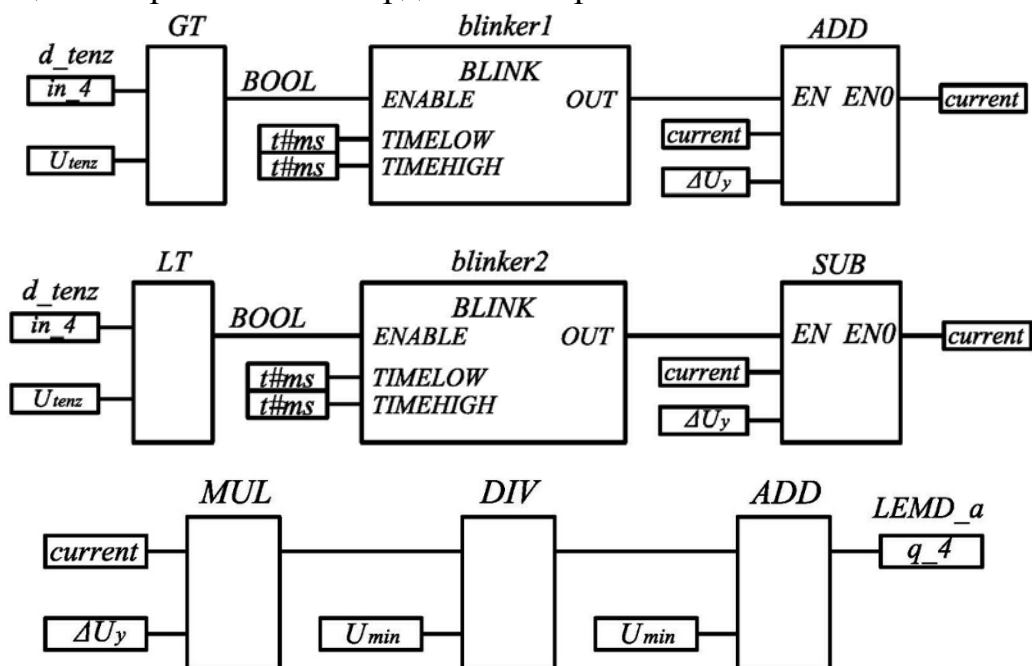


Рисунок 28 – Логические схемы управления плавным пуском и ходом якоря ЛЭМД.

На рисунке 27 показана номограмма, поясняющая действие системы с автокоррекцией выходного тягового усилия F_T . В начальный момент времени напряжение, подаваемое на обмотку ЛЭМД через твердотельное реле ТТР с управлением от программируемого логического контроллера ПЛК, составляет

$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТПР}} = 0,2 U_{\text{max}}^{\text{ТПР}}$. Якорь двигателя и рабочий орган РО под действием электромагнитной силы смещаются, одновременно воздействуя на тензодатчик ТНД (см. рисунок 26). От тензодатчика ТД сигнал обратной связи подается на аналоговый вход ПЛК, где в соответствии с программой формируется выходной аналоговый сигнал напряжения $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПЛК}}$ управления твердотельным реле ТТР (пунктирная линия на номограмме рисунок 27). Напряжение на обмотке ЛЭМД повышается, увеличивая значение тягового усилия F_{T} до тех пор, пока рабочий орган не начнет движение.

Таким образом, на обмотке ЛЭМД формируется напряжение, при котором обеспечивается усилие, необходимое для перемещения рабочего органа, например, транспортера или фаршевого поршня, и достигается плавность хода якоря ЛЭМД (см. рисунок 27).

Логическим схемам, представленным на рисунке 28, соответствует математическое выражение:

$$U_y = \frac{\text{current} \cdot \Delta U_y}{U_{\min}} + U_{\min}, \quad (19)$$

где U_y – напряжение на аналоговом выходе q_4 ($LEMD_a$) ПЛК, ΔU_y – значение приращения выходного напряжения; U_{\min} – минимальное напряжение на выходе q_4 ($LEMD_a$) ПЛК; current – текущее значение локального выхода.

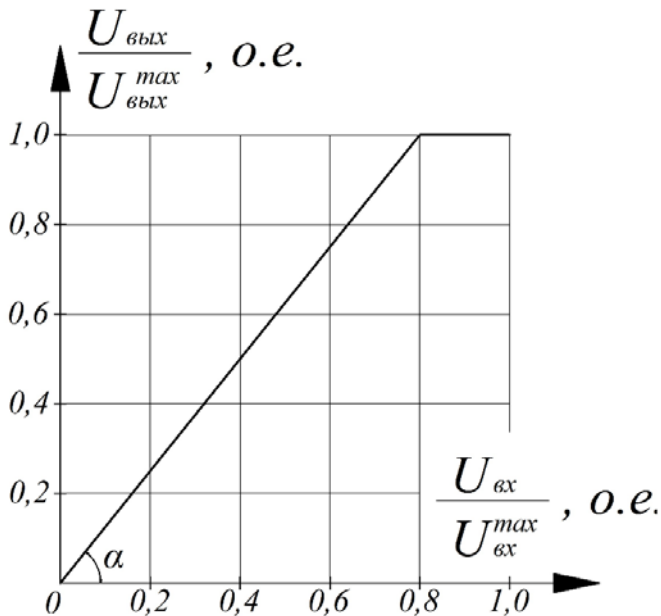


Рисунок 29 – Настроечная характеристика скорости перемещения рабочего органа

Настройка скорости движения рабочего органа осуществляется оператором при программировании, изменением коэффициента пропорциональности k П-закона регулирования ПЛК (рисунок 29):

$$k = \text{tg} \alpha = \frac{U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}}^{\max}}{U_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВХ}}^{\max}}, \quad (20)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВХ}}$ – выходное и входное напряжение ПЛК; $U_{\text{ВЫХ}}^{\max}$, $U_{\text{ВХ}}^{\max}$ – максимальные значения выходного и входного напряжения ПЛК, $\text{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона статической характеристики.

Таким образом, применение в ЛЭМД-приводах адаптивных управляющих систем, оценивающих в смежных циклах изменение нагрузки или свойства среды, позволяет (например, в системах неударного типа) скорректировать по нагрузке тяговое усилие, добиться плавности хода инструмента в каждом цикле изменением напряжения и мощности питающих импульсов в диапазоне 0,3...1,0 при одновременном снижении потребляемой от источника цикловой энергии до 35 % в сравнении с нерегулируемыми приводами.

В пятой главе «Физические модели и экспериментальные исследования ЛЭМД-приводов» разработаны методика и лабораторный стенд для экспериментального исследования рабочих процессов в ЛЭМД-приводах, оценены показатели и выходные характеристики с учетом оказывающих существенное влияние на режимы работы ЛЭМД-приводов факторов.

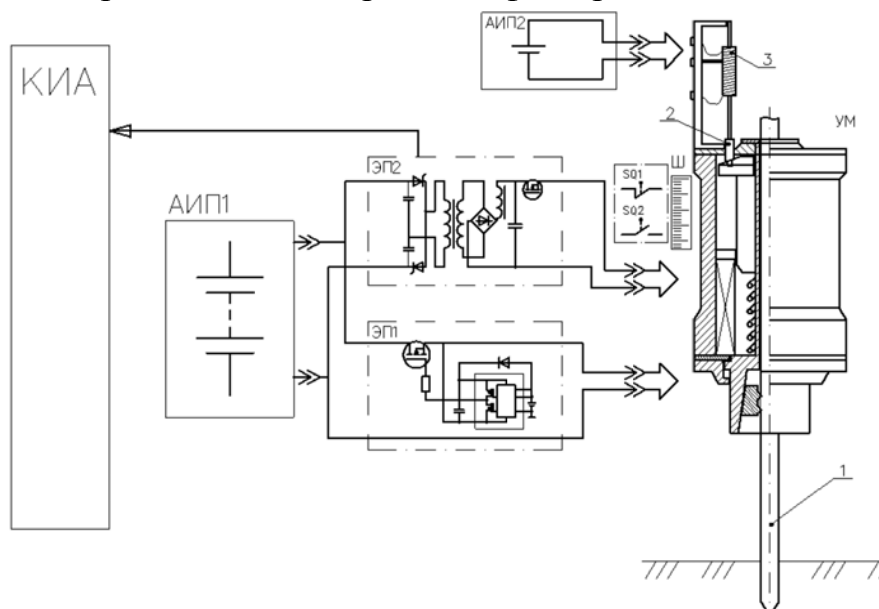


Рисунок 30 – Функциональная схема стенда для исследования рабочих процессов ударного ЛЭМД-привода



Рисунок 31 – Общий вид физической модели: 1 – забиваемый стержень; 2 – ударная машина с ЛЭМД; 3 – электрический преобразователь с емкостным накопителем энергии; 4 – конвертор; 5 – аккумуляторный источник питания

Экспериментальные исследования рабочих процессов ударных и безударных ЛЭМД-приводов обусловлены необходимостью получения полной информации об их характеристиках. Полученные закономерности позволяют обосновать рекомендации по рациональному выбору конструктивных и режимных параметров, обеспечить лучшие показатели привода. Неотъемлемой частью этих исследований при совершенствовании или создании ЛЭМД-приводов представляются определение и оценка динамических характеристик – напряжения u и тока i в обмотке двигателя, координаты якоря δ в функции времени t : $u = f(t)$, $i = f(t)$, $\delta = f(t)$.

Исследования выполнены с помощью физических моделей и экспериментальных установок,

оснащенных комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать интересующие физические величины. Функциональная схема и общий вид экспериментальной установки для исследования ударных ЛЭМД-приводов показаны на рисунках 30 и 31. Установка содержит ударную машину (УМ) с ЛЭМД; электрические преобразователи: ЭП1, подключаемый к аккумуляторному источнику питания АИП1, и ЭП2 с емкостным накопителем энергии.

Для детального выявления особенностей электрического взаимодействия ЛЭМД с преобразователями ЭП, проведена одновременная регистрация динамических характеристик: мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$, протекающего по его обмотке, а также перемещения якоря $\delta(t)$ в функции времени. Запись указанных величин осуществлялась на персональный компьютер, связанный с исследуемой системой совокупностью датчиков через многофункциональную плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В ходе исследований получены динамические характеристики ударного и безударного ЛЭМД-приводов, обработка которых с применением методов теории планирования многофакторного эксперимента позволила получить регрессионные уравнения и соответствующие поверхности отклика в факторном пространстве.

Таблица 2 – Основные характеристики плана трехфакторного эксперимента

Характеристика	Емкость накопителя, C, Φ	\bar{X}_1	Напряжение, U, B	\bar{X}_2	Жесткость пружины, $z, H/m$	\bar{X}_3
Основной уровень C_o, U_o, z_o	0,07	0	85	0	800	0
Интервал варьирования, $\Delta C, \Delta U, \Delta z$	0,06	–	35	–	300	–
Верхний уровень $C_{max}, U_{max}, z_{max}$	0,13	+1	120	+1	1100	+1
Нижний уровень $C_{min}, U_{min}, z_{min}$	0,01	–1	50	–1	500	–1

В частности, рассмотрено влияние параметров емкостного накопителя – емкости C и напряжения заряда U – и жесткости z возвратного элемента на механическую энергию A_y , частоту ударов n и КПД η ударного ЛЭМД-привода (таблица 2). Полученные регрессионные полиномы имеют вид:

$$A_y = 4,4 + 722,3C - 0,01U + 15,5CU - 0,089z; \quad (21)$$

$$n = 466,7C - 0,13U + 0,447z + 1,04Cz + 19444C^2 - 2879,5; \quad (22)$$

$$\eta = 3,75 + 109,9C + 0,028z + 0,22U + 0,19Cz - 1944,4C^2. \quad (23)$$

В качестве параметра оптимизации выбрана механическая энергия A_y . Наибольшее влияние на величину A_y (21) оказывают параметры емкостного накопителя C и U . Для варьируемых значений емкости промежуточного накопителя C и напряжения его заряда U от «–1» до «+1» при неизменной жесткости возвратного элемента z , построена поверхность отклика $A_y = f(C, U)$, при $z = const$ (рисунок 32).

Из диаграммы следует, что значение энергии удара A_y возрастает пропорционально емкости C промежуточного накопителя и квадрату напряжения U его заряда и достигает максимума, когда C и U находятся на уровне «+1» ($C=0,13$ Ф, $U=120$ В).

Вторым по значимости коэффициентом влияния в уравнении регрессии (21), выступает жесткость возвратной пружины z . На рисунке 33 представлена поверхность отклика в факторном пространстве $A_y=f(U, z)$, при значении емкости C на уровне «+1».

Наибольшее значение энергии удара A_y для рассмотренных поверхностей достигается при $z=800$ Н/м и значениях остальных факторов на уровне «+1». Изменение жесткости возвратного элемента, по сравнению с найденным, снижает механическую энергию A_y .

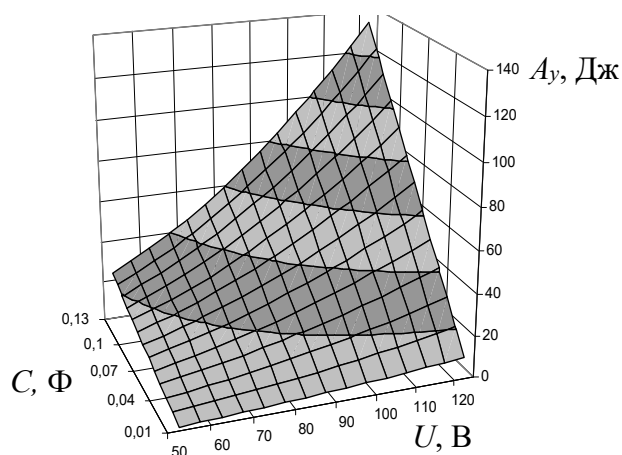


Рисунок 32 – Поверхность отклика $A_y=f(C, U)$ при z на уровне «-1».

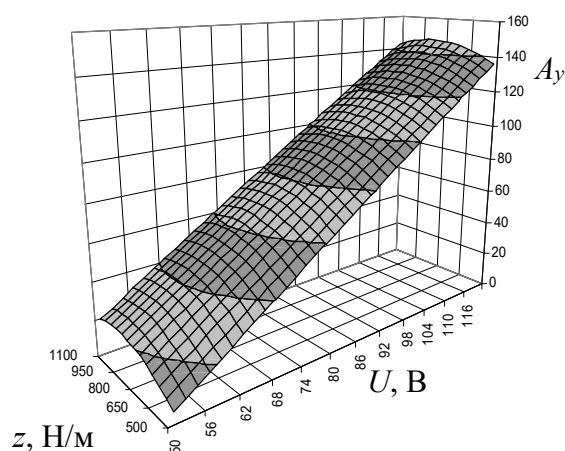


Рисунок 33 – Поверхность отклика $A_y=f(U, z)$ при C на уровне «+1».

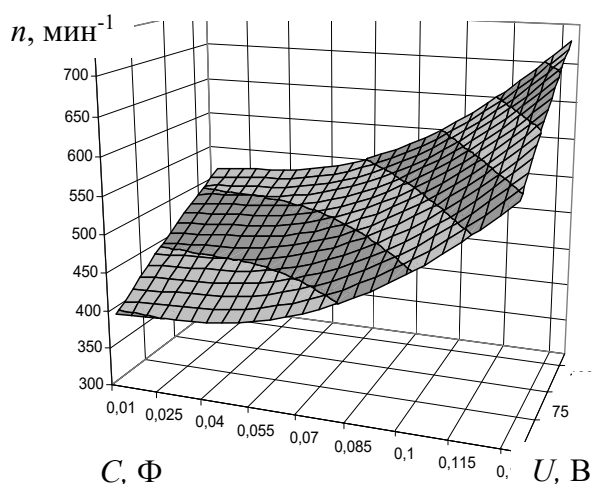


Рисунок 34 – Поверхность отклика $n=f(C, U)$ при z на уровне «+1»

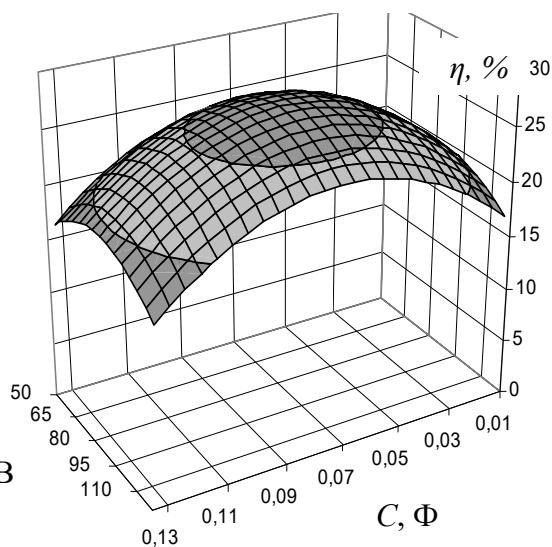


Рисунок 35 – Поверхность отклика $\eta=f(C, U)$ при z на уровне «0»

Анализ уравнения (22) показывает, что значительное влияние на частоту ударов n оказывают емкость C конденсаторного накопителя с коэффициентом

регрессии «+78» и напряжение его заряда U с коэффициентом «+45». На рисунке 34 представлена поверхность отклика $n=f(C,U)$ при z на уровне «+1». Наибольшая частота ходов n якоря достигается, когда напряжение U и емкость C промежуточного накопителя энергии находятся на уровне «+1» ($C=0,13$ Ф; $U=120$ В), так как уменьшается время рабочего хода.

Для оценки влияния емкости C промежуточного накопителя и напряжения его заряда U на КПД при условии $z=const$ была построена поверхность отклика $\eta=f(C,U)$ при z на уровне «0» (рисунок 35), Наибольшее значение η достигается при C и U на уровне «0». При увеличении напряжения U на интервале от «0» до «+1» ($C=const$ на уровне «-1») КПД уменьшается. Это объясняется тем, что разряд конденсаторного накопителя на обмотку напряжением «+1» создает значительные скорости изменения тока di/dt и магнитного потока dy/dt на этапе трогания якоря. Чем быстрее здесь возрастают ток и магнитный поток, тем больше наведенные вихревые токи, потери и меньше суммарное потокосцепление. Увеличение емкости C промежуточного накопителя энергии в интервале варьирования от «0» до «+1» обеспечивает плавность разрядного процесса, однако длительность разрядного импульса ведет к «залипанию» якоря и, соответственно, к увеличению потерь и уменьшению КПД.

Анализ регрессионных уравнений и (21)–(23) и поверхностей отклика (см. рисунки 32–35), проведенный для ЛЭМД-приводов ударного типа с диапазоном выходной механической энергии до 50 Дж, показал, что наилучшая совокупность удельных силовых, энергетических показателей и КПД достигается сочетанием значений емкости $C=0,04...0,06$ Ф и напряжения $U=60...80$ В.

В шестой главе «Результаты создания и технико-экономическая оценка внедрения ЛЭМД-приводов» представлены результаты создания ударных и безударных ЛЭМД-приводов, в том числе для неторцевой забивки продольно-неустойчивых стержневых элементов, кормораздаточных транспортеров, клипсования упаковки сельхозпродукции, сводообрушения, шприцевания колбасного фарша и другого назначения. Новизна примененных при создании этих систем и их элементов технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения и полезные модели. Воплощенные на практике изделия,



Рисунок 36 – Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции на предприятии ОАО «Знак Хлеба»

прошедшие полевые и производственные испытания, представлены на рисунках 36, 37.

В частности, технические возможности и эффективность использования ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции подтверждена производственными испытаниями на Саратовском хлебозаводе ОАО «Знак Хлеба» г. Саратов (см. рисунок 36).

Производственная проверка электромагнитного клипсатора показала его работоспособность и надежность выполнения операции наложения скрепок на упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий, высокие удельные показатели, компактность, хорошие массогабаритные и энергетические показатели, возможность ручной переноски по цеху к месту операции, минимальное время подготовки и запуска в работу.

Полевые испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт проведены совместно со специалистами ООО «МСК Энерго» (г. Саратов). Цель испытаний – подтвердить техническую возможность эффективного применения ЛЭМД-привода для погружения металлических стержневых элементов в грунт, используемых в качестве электродов заземления. В программу испытаний входила механизированная забивка металлических стержневых элементов в грунты различной плотности (см. рисунок 37).



Рисунок 37 – Полевые испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт: 1 – электромагнитная ударная машина; 2 – устройство управления; 3 – емкостной накопитель энергии; 4 – аккумуляторный источник питания

Производственные испытания показали, что время погружения одного стержня диаметром 14 мм и длиной до 2 м в зависимости от плотности грунта составляет 40–90 с, что превосходит показатели ручного способа. При этом механизированная забивка металлических продольно-неустойчивых стержней с помощью ЛЭМД-привода сокращает число работающих операторов.

Основным приемом выявления экономической эффективности капиталовложений в новую технику служит сравнение предлагаемой и используемой в производстве машин. В таблицах 3 и 4 приведены технико-экономические показатели внедрения ЛЭМД-привода для погружения в грунт продольно-неустойчивых стержневых элементов и кормораздаточного транспортера для птицеводческого предприятия (птицефабрики) со средним количеством птичников 6, в которых установлены по 6 кормораздаточных транспортеров.

Таблица 3 – Техничко-экономические показатели внедрения ЛЭМД-привода для погружения в грунт продольно-неустойчивых стержневых элементов

Показатель	Значение	
	Пневмоударный привод	ЛЭМД-привод
Капиталовложения (инвестиции), руб.	465000	40000
Эксплуатационные затраты, руб.	223086	53013
Себестоимость погружения одного стержня, руб.	89	21
Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб.	–	170000
Срок окупаемости, лет	–	0,3
Чистый дисконтированный доход или интегральный эффект, тыс. руб.	–	600

Таблица 4 – Техничко-экономические показатели внедрения ЛЭМД-привода кормораздаточного транспортера

Показателей	Значение	
	Привод с АД	ЛЭМД-привод
Капиталовложения (инвестиции), руб.	1519200	691200
Эксплуатационные затраты, руб.	732276	343224
Себестоимость одного цикла раздачи корма, руб.	18,58	8,7
Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб.	–	389448
Срок окупаемости, лет	–	1,8
Чистый дисконтированный доход или интегральный эффект, тыс. руб.	–	775,072

Годовая экономия эксплуатационных расходов и чистый дисконтируемый доход за 6 лет эксплуатации от внедрения предлагаемых ЛЭМД-приводов в сельхозпроизводство для характерных операций составляет от 150 тыс. руб. и от 600 тыс. руб. соответственно в расчете на одну систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщенные в диссертации исследования нацелены на решение научно-технической проблемы создания и совершенствования ударных, безударных ЛЭМД-приводов, соответствующих требованиям к операциям и процессам АПК, способных конкурировать с традиционными электроприводами, гидравлическими и пневматическими системами.

Основные научные и практические результаты исследований состоят в следующем.

1. Оценены преимущества, показана конкурентность применения ЛЭМД-приводов в сельхозпроизводстве и на предприятиях АПК, основанная на снижении затрат на оборудование – в 3–6 раз; энергопотребления для ударных и безударных операций, процессов и технологий – в 2–3 раза; материалоемкости приводов и машин – в 1,7–3 раза по сравнению с пневматическими и гидравлическими системами сходного назначения.
2. Исследованием теоретических и имитационных моделей магнитной системы, процессов нагревания-охлаждения цилиндрических электромеханических электромагнитных преобразователей установлено и для магнитных систем экспериментально, на физических образцах ЛЭМД-приводов, с расхождением до 17 %, подтверждено:
 - сквозной осевой канал диаметром до 0,3 диаметра якоря в магнитопроводе, снижающий силовые и энергетические показатели двухзазорного цилиндрического ЛЭМД до 15 % в сравнении с ЛЭМД без канала, расширяет функциональность и области эффективного применения и двигателей, и ЛЭМД-приводов;
 - повышение нормированного значения продолжительности включения ПВ или необходимое уменьшение нагрева ЛЭМД-привода обеспечивается: при нефорсированном энергопитании – увеличением исходной внешней теплоотдающей поверхности $F_{охл}$ двигателя до значения не более $2,5 F_{охл}$ при пренебрежимом снижении удельных показателей системы; при форсированном питании – интенсификацией движущимся якорем охлаждающих воздушных потоков – самовентиляцией, действие которой эквивалентно уменьшению теплового сопротивления исходного двигателя до 35 %;
 - самовентиляция обеспечивает работу ЛЭМД-привода в продолжительном режиме S1, когда потребляемая за единичный цикл от источника энергия не превышает 550...600 Дж на квадратный метр охлаждающей поверхности двигателя.
3. Интегрирование в моноконструкцию ЛЭМД-привода и зажимного механизма со сферическими, взамен острооробренных конусных, поперечно-заклинивающими на рабочем ходе δ в осевом канале инструмент или рабочий орган элементами расширяет области эффективного применения, обеспечивая использование привода для одно- или попеременного двунаправленного перемещения S инструмента, многократно $n\delta$, $n=1,2,\dots$ превышающего рабочий зазор и ход δ якоря двигателя $S=n\delta$ и увеличивая ресурс инструмента.

4. Применение в ЛЭМД-приводах адаптивных управляющих систем, оценивающих в смежных циклах изменение нагрузки или свойства среды, позволяет:
- в системах ударного действия – снизить предопределяемую превентивной форсировкой избыточность выходной механической энергии на 20–30 % подстройкой параметров смежных совокупностей питающих электрических импульсов изменением характеристик источника питания;
 - в системах неударного типа – скорректировать по нагрузке тяговое усилие, добиться плавности хода инструмента в каждом цикле изменением напряжения и мощности питающих импульсов в диапазоне 0,3...1,0 при одновременном снижении потребляемой от источника цикловой энергии до 35 % в сравнении с нерегулируемыми приводами.
5. Исследованием физических и полученных на основе теории планирования экспериментов математических моделей ЛЭМД-привода показана предпочтительность электропитания этих систем от комбинированных источников, оснащаемых разделенным на секции емкостным накопителем и улучшающих показатели регулирования выходной механической энергии системы. Показано, что для ЛЭМД-приводов ударного типа с диапазоном выходной механической энергии до 50 Дж наилучшая совокупность удельных силовых, энергетических показателей, КПД достигается сочетанием значений емкости $C=0,04...0,06$ Ф и напряжения $U=60...80$ В.
6. На основе выполненных исследований усовершенствованы, созданы и испытаны в технологиях АПК ЛЭМД-приводы для кормораздачи, прессования и получения сока, шприцевания колбасного фарша, наложения скрепок на упаковку и др., повышающие эффективность и показатели качества выполняемых операций за счет электромеханизации и автоматизации процессов, соответствующие требованиям экологичности и безопасности.

Годовая экономия эксплуатационных расходов и чистый дисконтируемый доход за 6 лет эксплуатации от внедрения предлагаемых ЛЭМД-приводов в сельхозпроизводство для характерных операций составляет от 150 тыс. руб. и от 600 тыс. руб. соответственно в расчете на одну систему, что подтверждает целесообразность их использования в технологиях и на объектах АПК.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Рассмотренные в диссертации электромеханические преобразователи ЛЭМД-приводов – броневые цилиндрические двухзазорные линейные электромагнитные двигатели не являются готовыми, серийно выпускаемыми изделиями. Поэтому применение ЛЭМД-приводов в виде законченных электромеханических систем в технологиях на предприятиях АПК требует выполнения комплекса проектных (изготовление рабочей документации) и опытно-конструкторских работ, проведения испытаний вначале ограниченного типоразмерного ряда линейных электромагнитных двигателей с выходной

механической энергией $A_y=50\dots500$ Дж с механизмами передачи мощности нагрузке. Другие необходимые элементы электромеханической системы – источники питания, управляющие устройства – целесообразно укомплектовывать серийно выпускаемыми изделиями: аккумуляторными батареями, программируемыми контроллерами, преобразователями напряжения, емкостными накопителями энергии – с учетом назначения и области применения электромеханической системы.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшее улучшение свойств и реализация потенциальных возможностей ЛЭМД-приводов предполагает не только развитие результатов исследований приведенных, в том числе, в настоящей работе, но и постановку и решение других задач, возникающих по мере совершенствования как сельскохозяйственной отрасли, так и технологий агропромышленного комплекса.

Особый интерес для последующей разработки темы представляют развитие теоретических исследований в области повышения эффективности энергопреобразовательных процессов в ЛЭМД-приводах, изучение и оценка показателей качества регулирования адаптивных управляющих систем, расширение областей эффективного использования реверсивных ЛЭМД-приводов в операциях, процессах и технологиях АПК.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Усанов, К. М. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт / К. М. Усанов, **В. А. Каргин** // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.

2. Усанов, К. М. Преобразователь сигналов датчика предупредительной скорости бойка импульсной ударной машины / К. М. Усанов, **В. А. Каргин** // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 2. – С. 56–57.

3. **Каргин, В. А.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом / В. А. Каргин, К. М. Усанов, А. В. Волгин // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – № 3. – С. 86–87.

4. Усанов, К. М. Оценка продолжительности погружения стержневых элементов в грунт электромагнитной ударной машиной / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, А. В. Волгин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2008. – № 3. – С. 70–71.

5. Усанов, К. М. Оценка теплового состояния импульсной электромагнитной машины / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, И. В. Трубенкова // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2010. – № 7. – С. 65–67.

6. Усанов, К. М. Интенсификация процесса теплопередачи в импульсных электромагнитных машинах / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, Т. А. Филимонова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 9. – С. 75–78.

7. Усанов, К. М. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, И. В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 12. – С. 67–70.

8. **Каргин, В. А.** Импульсный электромагнитный привод тросошайбового кормораздатчика с однонаправленным движением рабочего органа / В. А. Каргин, К. М. Усанов, А. П. Моисеев // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 3. – С. 14–16.

9. **Каргин, В. А.** Тепловой расчет электромагнитного двигателя импульсной машины / В. А. Каргин, К. М. Усанов, Т. А. Филимонова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 7. – С. 16–18.

10. **Каргин, В. А.** Исследование теплового процесса импульсного электромагнитного двигателя / В. А. Каргин, К. М. Усанов, С. М. Зубарев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 5. – С. 18–20.

11. Усанов, К. М. Использование линейного электромагнитного двигателя для упаковки сельскохозяйственной продукции / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, С. А. Ивченко, А. В. Ивченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. – № 1. – С. 22–23.

12. Усанов, К. М. Интенсификация охлаждения импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, А. С. Козлов // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 1. – С. 16–17.

13. Усанов, К. М. Импульсная система с линейным электромагнитным двигателем для интенсификации разгрузки бункеров / К. М. Усанов, А. В. Волгин, **В. А. Каргин** // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 255–258.

14. Усанов, К. М. Оценка тепловых процессов в линейных электромагнитных двигателях с искусственным охлаждением / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, А. П. Моисеев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 6. – С. 60–63.

15. Усанов, К. М. Экспериментальная оценка силовых показателей электропривода тросошайбового транспортера с линейным электромагнитным двигателем / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, А. П. Моисеев, Е. А. Четвериков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2015. – № 6. – С. 69–72.

16. Львицын, А. В. Обоснование конструкции и расчет параметров линейного электромагнитного двигателя сводообрушителя / А. В. Львицын, А. В. Волгин, **В. А. Каргин**, И. Ю. Лошкарев // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 8. – С. 48–50.

17. Моисеев А. П. Совершенствование электрического преобразователя электромагнитного привода кормораздаточного транспортера / А. П. Моисеев, **В. А. Каргин**, А. В. Волгин // Известия Международной академии аграрного образования. – 2016. – № 31. – С. 41–43.

18. **Каргин, В. А.** Система управления плавным ходом якоря ЛЭМД кормораздаточных транспортеров за счет автоматической корректировки выходного

усилия / В. А. Каргин, А. П. Моисеев, А. В. Волгин, Н. Н. Белова // Известия Международной академии аграрного образования. – 2017. – № 37. – С. 15–18.

19. **Каргин, В. А.** Электрический преобразователь электромагнитной ударной машины с конденсаторным питанием / В. А. Каргин, А. В. Волгин, А. П. Моисеев // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – № 43. – С. 20–23.

20. **Каргин, В. А.** Электрический преобразователь с автоподстройкой выходного усилия электромагнитного формователя колбасных изделий / В. А. Каргин, А. В. Волгин, А. П. Моисеев, О. В. Логачёва // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (160). – С. 176–180.

21. **Каргин, В. А.** Система управления электромагнитным прессом для отжима сока / В. А. Каргин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 4 (174). – С. 155–160.

22. **Каргин, В. А.** Система автоматического управления электромагнитным сводообрушителем / В. А. Каргин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 6 (176). – С. 148–154.

В научных изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus

23. Usanov K. M. Power Electromagnetic Strike Machine for Engineering-Geological Surveys / K. M. Usanov, A. V. Volgin, E. A. Chetverikov, **V. A. Kargin**, A. P. Moiseev, Z. I. Ivanova // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 2017. – 87 032049.

24. Usanov, K. M. Strike Action Electromagnetic Machine for Immersion of Rod Elements into Ground / K. M. Usanov, A. V. Volgin, E. A. Chetverikov, V. A. Kargin, A. P. Moiseev, Z. I. Ivanova // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 2017. – 87 032050.

25. **Kargin, V. A.** Adaptive System for Automatic Control of Output Effort of Electromagnetic Sausage-Filler / V. A. Kargin, A. V. Volgin, A. P. Moiseev // 14th International Scientific-Technical conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings APEIE-2018. – Vol. 1. – Part 6. – 44894.

26. **Kargin, V. A.** Evaluation of the Possibility of Using Self-Ventilation to Cool Forced Electromagnetic Shock Engines / V. A. Kargin, A. V. Volgin, A. P. Moiseev, A. M. Maradudin., A. A. Leontiev // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032009.

27. **Kargin, V. A.** Increasing the Efficiency of a Linear Stepper Electromagnetic Engine / V. A. Kargin, A. P. Moiseev, A. M. Maradudin, A. V. Peretyatko // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032008.

28. Usanov, K. M. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Battery Power / K. M. Usanov, A. V. Volgin, **V. A. Kargin**, E. A. Chetverikov, A. P. Moiseev // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 327 (2018) 052031.

29. Usanov, K. M. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Capacitor Supply / K. M. Usanov, A. V. Volgin, **V. A. Kargin**, E. A. Chetverikov, A. P. Moiseev // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 327 (2018) 052031.

30. Volgin, A. V. Pulse System Electromagnetic Linear Engine for Vaults Downfall in Bunkers // A. V. Volgin, V. A. Kargin, A. P. Moiseev, E. A. Chetverikov, E. V. Volgina, L. A. Lagina // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032030.

31. **Kargin, V. A.** The Electromagnetic Juice Press Control System / V. A. Kargin, A. V. Volgin, A. P. Moiseev // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 20184 January 2019 8602715.

32. **Kargin, V. A.** Electromagnetic Strike Action System with Self-Adjustment of Output Energy / V. A. Kargin, A. V. Volgin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 20184 January 2019 8602647.

В монографиях

33. Усанов К. М. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях : [монография] / К. М. Усанов, В. И. Мошкин, **В. А. Каргин**, А. В. Волгин. – Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2015. – 202 с. – ISBN 978-5-4217-0313-6.

В авторских свидетельствах и патентах

34. Патент на полезную модель **RU 40331 U1** Российская Федерация, МПК **Е 02 D 7/02**. Устройство ударного действия для забивания в грунт стержневых элементов / Угаров Г. Г., Усанов К. М., **Каргин В. А.**, Волгин А. В. – Оpubл. 10.09.2004, Бюл. № 25.

35. Патент на полезную модель **RU 59342 U1** Российская Федерация, МПК **Н 02 К 33/02**. Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря / Усанов К. М., Мошкин В. И., Волгин А. В., **Каргин В. А.** – Оpubл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

36. Патент на изобретение **RU 2366065** Российская Федерация, МПК **Н 02 К 41/03**. Линейный шаговый электромагнитный двигатель / Усанов К. М., Моисеев А. П., **Каргин В. А.**, Волгин А. В. – Оpubл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

37. Патент на изобретение **RU 2440661** Российская Федерация, МПК **Н 02 К 41/03**. Реверсивный линейный электромагнитный двигатель с осевым каналом / Усанов К. М., Моисеев А. П., **Каргин В. А.**, Волгин А. В. – Оpubл. 20.01.2012, Бюл. № 2.

38. Патент на изобретение **RU 2488212 C1** Российская Федерация, МПК **Н 02 К 41/03**. Линейный шаговый электромагнитный двигатель с осевым каналом и протяжным устройством с зацеплением за шайбы / Усанов К. М., Моисеев А. П., **Каргин В. А.**, Волгин А. В. – Оpubл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

39. Патент на полезную модель **RU 151714 U1** Российская Федерация, МПК **В 65 В 51/05**. Устройство для образования и наложения скрепок на концы рукавных оболочек или пакетов / Усанов К. М., **Каргин В. А.**, Ивченко А. В. – Оpubл. 10.04.2015, Бюл. № 10.

40. Патент на полезную модель **RU 161875 U1** Российская Федерация, МПК **Н 02 К 41/03**. Линейный шаговый электромагнитный двигатель / Усанов К. М., Моисеев А. П., **Каргин В. А.**, Волгин А. В. – Оpubл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

41. Патент на полезную модель RU 162786 U1 Российская Федерация, МПК В 25 D 11/04. Устройство ударного действия для разрушения сводов в бункерах / Усанов К. М., Моисеев А. П., Волгин А. В., **Каргин В. А.** – Оpubл. 27.06.2016, Бюл. № 18.

42. Патент на полезную модель RU 174620 U1 Российская Федерация, МПК В 02 В 9/06. Пресс для отжима сока / Усанов К. М., Волгин А. В., **Каргин В. А.**, Моисеев А. П., Четвериков Е. А. – Оpubл. 23.10.2017, Бюл. № 30.

В журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

43. Усанов, К. М. Оценка выходных показателей электромагнитной ударной машины с емкостным накопителем / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, А. В. Волгин // Вавиловские чтения – 2008 : материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов : ИЦ «Наука», 2008. – Ч. 3. – С. 217–219.

44. Усанов, К. М. Оценка влияния конструктивных и режимных параметров на КПД электромагнитного привода сельскохозяйственного назначения / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, И. В. Трубенкова // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции : сборник научных докладов XV международной научно-практической конференции. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2009. – С. 559–562.

45. Усанов, К. М. Оценка теплового потока электромагнитного двигателя импульсной машины / К. М. Усанов, **В. А. Каргин**, И. В. Трубенкова // Научное обеспечение агропромышленного производства : материалы Международной научно-практической конференции. – Курск : Изд-во ФГОУ ВПО «Курская ГСХА им. И.И. Иванова», 2010. – С. 231–236.

46. **Каргин, В. А.** Оценка эффективности охлаждения линейных электромагнитных двигателей с самовентиляцией / К. М. Усанов, В. А. Каргин, А. С. Козлов // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы III международной научно-практической конференции. – Саратов : КУБиК, 2012. – С. 268–272.

47. **Каргин, В. А.** Система управления электромагнитной ударной машиной / В. А. Каргин // Образовательная среда сегодня и завтра : материалы X Международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во НОУ ВО Московский технологический институт, 2015. – С. 303–306.

48. **Каргин, В. А.** Оценка надежности электроприводов с линейным перемещением рабочего органа в установках для клипсования колбасных изделий / В. А. Каргин, О. В. Логачёва, С. С. Лёвин // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы IX международной научно-практической конференции. – Саратов : КУБиК, 2018. – С. 58–60.

49. **Каргин, В.А.** Линейный шаговый электромагнитный двигатель привода конвейеров / В. А. Каргин, А. В. Волгин, А. К. Федоров, Г. Н. Селезнев // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием. – Саратов : КУБиК, 2019. – С. 116–119.