

МОШКИН Владимир Иванович

**ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ С ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ
ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Энергетика и технология металлов» ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Угаров Геннадий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Симонов Борис Ферапонтович**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Си-
бирского отделения Российской академии наук», г. Ново-
сибирск, заведующий лабораторией «Силовые электро-
магнитные импульсные системы»;

Аипов Рустам Сагитович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Баш-
кирский государственный аграрный университет», г. Уфа,
заведующий кафедрой «Электрические машины и элек-
трооборудование»;

Певчев Владимир Павлович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Гольят-
тинский государственный университет», профессор ка-
федры «Промышленная электроника»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Защита состоится «28» марта 2018 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного сове-
та Д **212.285.03** на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд.
И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Ураль-
ский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
<http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=274939>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из актуальных стратегических задач в Российской Федерации – это технологическая модернизация производственных процессов, направленная на создание конкурентоспособной техники для прогрессивных технологий в машиностроении, строительстве, горном деле и других отраслях. Значительная их часть выполняется с помощью импульсных технологий, которые позволяют получить конечный продукт с меньшими затратами энергетических и материальных ресурсов.

Существует обширная группа машин (поршневые компрессоры, насосы, прессы, молоты, перфораторы, сейсмоисточники, активаторы и др.), рабочие процессы в которых предполагают применение возвратно-поступательного движения рабочего органа по линейной траектории. Обычно для реализации такого рода движения с помощью традиционных электродвигателей между рабочим органом и приводным двигателем ставится дополнительное механическое устройство, преобразующее вращательное движение в возвратно-поступательное, что увеличивает габариты, стоимость и снижают надежность всего устройства.

Становится весьма привлекательным создать привод непосредственно возвратно-поступательного движения. Это позволяет вводить в рабочую зону технологического объекта концентрированные потоки механической энергии высокой плотности в импульсной форме. Такой привод в своей структуре содержит главный силовой элемент – электрический двигатель возвратно-поступательного движения, наилучшим образом согласованный по роду движения с рабочим органом машины.

Недостатки пневматических, гидравлических и гидропневматических машин вибрационного и ударного действия и стремление в модернизации технологий, в которых они применяются, вызвали необходимость создания ударных машин с электроприводом. Значительный вклад в разработку этой проблемы внесли А.И. Москвитин, О.Д. Алимов, П.М. Алабужев, А.В. Гордон, Н.П. Ряшенцев, Ф.Н. Сарапулов, Е.М. Тимошенко, E.R. Laitwaite, Г.Г. Угаров, Б.Ф. Симонов, Ю.З. Ковалев, А.Н. Мирошниченко, В. В. Ивашин, К. М. Усанов, А.Т. Малов, В.Н. Федонин, С.Ю. Кудараускас (S. Kudarauskas), В.Ю. Нейман, В.Т. Караваев, А. В. Львицын, В.П. Певчев, Р.С. Аипов, В.В. Тиунов, И.Г. Ефимов, А.И. Смелягин, Ю.Н. Казаков и другие специалисты. В их работах отражены результаты исследований линейных электроприводов, в том числе ударного действия, и их практическая реализация.

Импульсный подвод энергии в ряде случаев имеет значительные преимущества перед непрерывным характером энергопотребления технологическим объектом. В связи с этим возникает комплекс теоретических, экспериментальных, расчетных и инженерных задач по совершенствованию существующих и созданию новых импульсных электрических приводов возвратно-поступательного движения.

Силовые электромагнитные импульсные системы (СЭМИС), в состав которых входят импульсные линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД), обеспечивают наилучшие условия совместимости или интеграции приводного двигателя и рабочего органа машины и поэтому представляются наиболее перспективными.

Импульсные ЛЭМД относятся к импульсным электромеханическим преобразователям (ЭМП) электромагнитного типа и представляют собой самостоятельный класс специальных электрических машин, обладающих рядом специфических свойств: ограниченностью механического перемещения, дискретным энергопреобразованием, циклическим характером работы.

Для реализации технологических процессов с высококонцентрированными потоками энергии с помощью импульсных ЛЭМД необходимо повысить их энергоэффектив-

ность. При этом для расширения технологических возможностей машин ударного действия с импульсными ЛЭМД требуется регулирование их выходных параметров: энергии удара (полезной работы), частоты ходов, тягового усилия.

Анализ энергоёмкости различных импульсных технологических процессов показывает, что достигнутый и требуемый уровни удельной энергии удара в электромагнитных машинах ударного действия составляют: для ручных машин соответственно 1...3 Дж/кг и 10...20 Дж/кг, для мощных молотов (с энергией удара до 30 кДж) – 2...6 Дж/кг и 7...12 Дж/кг, для переносных молотов (с энергией удара до 1 кДж) – 2...5 Дж/кг и 6...15 Дж/кг.

Исследования, обобщенные в диссертации, являются продолжением работ по созданию импульсных ЛЭМД и машин на их основе, предназначенных для механизации трудоемких процессов горного, строительного и машиностроительного производств и соответствуют программам и темам:

- научно-координационный план СО РАН по проблеме машиностроения 1.11.1 – «Теория машин и систем машин» по теме «Динамика и синтез механизмов для возбуждения силовых воздействий большой интенсивности»;

- приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: «Энергетика и энергосбережение»;

- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: «Энергоэффективность и энергосбережение»;

- критическим технологиям: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»;

- заданию № 2014/77 по теме № 8.2654 «Исследование энергоэффективных импульсных линейных электромагнитных двигателей» на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки России (2014-2015 гг.);

- НИР ФГОУ ВО «Курганский государственный университет» по теме № 195 «Импульсные ЛЭМД с повышенными энергетическими и силовыми показателями» (2006-2010 гг.) и по теме № 263 «Исследование линейного электромагнитного привода машин для импульсных технологий» (2011-2015 гг.)

Цель работы состоит в разработке методов и технических средств повышения удельных энергетических и силовых показателей импульсных ЛЭМД, создании и внедрении их и машин на их основе для реализации технологических процессов с высококонцентрированными потоками энергии.

В связи с этим поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Выявить требования к параметрам механической энергии в высококонцентрированных технологиях.

2. Разработать оптимальные конструкции магнитных систем с интегральными функциями структур электромагнитного двигателя.

3. Выявить условия и способы концентрации магнитной энергии в рабочих зазорах импульсных ЛЭМД.

4. Установить связь между уровнем концентрации магнитной энергии рабочих зазоров двигателя и конструктивно-режимными факторами.

5. Определить наилучший режим концентрации магнитной энергии рабочих зазоров двигателя на этапе трогания.

6. Разработать критерии оценки эффективности электромеханических режимов импульсных ЛЭМД.

7. Установить взаимное влияние структурных подсистем ЛЭМД на эффективность электромеханических режимов.

8. Определить функциональные связи электромеханических характеристик ЛЭМД с энергетическими режимами.

9. Разработать методы расчета импульсных ЛЭМД широкого диапазона энергий и частот воздействия на технологический объект.

10. Разработать энергоэффективные процессы с требуемым характером изменения параметров (регулируемые и стабильные).

11. Разработать схемные и конструктивные решения технологического оборудования с ЛЭМД.

Методы исследования базировались на применении фундаментальных законов и уравнений электродинамики и теории электрических и магнитных цепей, теории электрических машин и автоматизированного электропривода. Поиск количественных соотношений между исследуемыми параметрами осуществлялся с помощью аналитических методов математического анализа и численных методов решения задач. Для ускорения решения поставленных задач использовались программы MathCad, Statistica, для математического моделирования магнитных систем импульсных ЛЭМД использовалась программа Elcut.

Достоверность полученных результатов исследований определялась корректностью постановки задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых математических моделей, а также степенью совпадения теоретических и практических результатов, полученных экспериментально на реальных моделях импульсных ЛЭМД в лабораторных и производственных условиях с использованием специально разработанных стендов и методик.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

- применение энергетических критериев для определения эффективности магнитных циклов может использоваться для самостоятельной оценки энергетических показателей импульсных ЛЭМД;

- укорочение длины магнитной системы импульсного ЛЭМД при сохранении неизменным объема его активных материалов позволяет повысить их удельные силовые показатели до 30...50%;

- определение рациональных геометрических размеров импульсных ЛЭМД позволяет разработать инженерные методики их расчета по заданной полезной работе и тяговому усилию при минимальном объеме активных материалов;

- изменение уровня магнитной энергии, аккумулируемой в рабочих зазорах на этапе трогания якоря, позволяет создать импульсные ЛЭМД с повышенными в 2...2,5 раза энергетическими показателями.

Научная новизна:

- впервые выявлены четырнадцать энергетических режимов ЭМП, из них семь – для импульсного ЛЭМД, отличающиеся между собой степенью восстановления магнитной энергии, сконцентрированной в рабочих зазорах двигателя при движении якоря. Среди них определены такие режимы, при работе по которым импульсный ЛЭМД способен радикально повысить свою удельную механическую работу. Работа импульсного ЛЭМД в энергетическом режиме $\Psi_k > \Psi_n$, $I_k < I_n$ при коэффициенте восстановления $-1 < k_b < 0$ и тем более в режиме $\Psi_k = \Psi_n = \text{const}$ позволит увеличить удельную механическую работу двигателя (энергию удара) в два и более раза, что подтверждено экспериментами;

- впервые установлены области допустимых сочетаний геометрических параметров элементов магнитных систем интегрированного ЛЭМД на основе общего магнитопровода;

- с помощью принципа взаимности для электромеханических систем обобщено соотношение между интегральной механической работой импульсного ЛЭМД, определяе-

мой по статическим тяговым и противодействующим характеристикам, и энергией рабочего хода этого двигателя;

- теоретически обоснован и практически подтвержден факт уменьшения энергии удара импульсного ЛЭМД в случае ввода сторонней механической энергии в электро-механическую систему при совпадении направлений тягового усилия и скорости движения якоря;

- определены оптимальные геометрические параметры цилиндрического ЛЭМД с двумя рабочими зазорами исходя из минимума объема активных материалов;

- теоретически и экспериментально обоснованы условия укорочения длины магнитной системы импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля;

- разработаны на уровне изобретений конструкции импульсных ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, имеющие повышенные в сравнении с известными удельные силовые и энергетические показатели;

- выявлено влияние режимных и конструктивных параметров ударной машины с однообмоточным ЛЭМД и возвратной пружиной на его предельную ударную мощность, для ее повышения предложено использовать вместо однообмоточного двигателя разработанный двухобмоточный;

- предложен способ передачи дополнительной магнитной энергии потоков рассеяния в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД, позволяющий повысить его механическую энергию на 30–35%;

- разработаны на уровне изобретений устройства питания и управления (УПУ) ЛЭМД, обеспечивающие надежную и экономичную работу с регулированием энергии удара и частоты ходов, а также стабилизацию энергии удара при изменении напряжения источника.

Вклад автора заключается в разработке, испытании и внедрении в производство электромагнитных машин с повышенной в 2...2,5 раза удельной энергией удара, двухобмоточного ЛЭМД с активным возвратом якоря, а также однообмоточного ЛЭМД с укороченной магнитной системой.

Энергоэффективные режимы реализованы в конструкциях ЛЭМД со встроенным устройством удержания якоря. Автором разработаны УПУ, позволяющие регулировать выходные параметры ЛЭМД

Предложенные автором методики позволяют выполнить проектный расчет ЛЭМД по заданным тяговому усилию или энергии рабочего хода.

Практическое значение работы заключается:

- в разработке новых конструкций магнитных систем ЛЭМД: с укороченной длиной магнитной системы продольного и поперечного поля, с ферромагнитным направляющим корпусом, с встроенным в магнитную систему устройством удержания якоря, позволяющие в 1,5...2 раза повысить удельные значения тягового усилия и механической энергии двигателей, расширить их функциональные возможности и область применения;

- в определении областей допустимых изменений параметров импульсных ЛЭМД, исключаящих их влияние на питающую сеть;

- в разработке инженерных методик определения геометрических размеров ЛЭМД с заданными полезной работой и тяговым усилием;

- в разработке и испытании в лабораторных и производственных условиях различных конструкций импульсных ЛЭМД и созданных на их основе электромагнитных машин, защищенных 14 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения;

- в разработке универсальных УПУ, обеспечивающих регулирование частоты ходов, энергии удара с ее стабилизацией при изменении напряжения источника.

Реализация результатов работы состоит в том, что

- разработаны и внедрены машины и оборудование с импульсными ЛЭМД в машиностроении, литейном и металлургическом производствах, электротехнической промышленности, строительстве, на железнодорожном транспорте и др.: на технологических операциях проколки отверстий в корпусах изделий из оцинкованного листа (Омутнинский металлургический завод), на операции завальцовки корпусов химических источников тока (Новосибирский завод химконцентратов), на операции вырубки слюды (Балашовский слюдяной комбинат), на операциях изготовления фурнитуры кожгалантерейных изделий (Саратовская кожгалантерейная фабрика), на операциях погружения стержневых заземлителей в грунт (ООО «Инко Строй-Монтаж», г. Саратов), на операциях холодной штамповки и сборки (Саратовский завод электротермического оборудования), на операциях локального вытеснения металла при наплавке (сварочные производства предприятий г. Саратова), на операциях терморезания при восстановлении железнодорожных колесных пар (Саратовское депо), на операциях сводообрушения в мукомольном производстве (Саратовская область).

- разработанные методы проектирования и моделирования импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля внедрены в учебный процесс КГУ в виде научных монографий и учебных пособий по дисциплинам «Введение в специальность», «Электрические машины», «Преобразовательная техника в электроприводе», «Электротехнологические промышленные установки» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ой научно-технической конференции «Повышение надежности, экономичности и конкурентоспособности асинхронных электродвигателей и электроприводов», г. Кемерово, 1992 г.; на десятой и одиннадцатой научно-технических конференциях «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 1995 и 1998 гг.; на Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, 1995 г.; на XV Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции», г. Тамбов, Россия, 2009 г.; на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», г. Саратов, Россия, 2010 г.; на VI и VII Всероссийских научно-практических конференциях «Инновационные технологии в обучении и производстве», г. Камышин, 2010 и 2014 гг.; на I Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2011 г.; на VII Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», г. Варна, Болгария, 2012 г.; на пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – ЭППТ 2012, г. Екатеринбург, Россия, 2012 г.; на LI и LIII Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2013 и 2014 гг.; на III Международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» – АПЭЭТ-2014, г. Екатеринбург, Россия, 2014 г.; на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» – АПЭП-2014, г. Саратов, Россия, 2014 г.; на IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2016, г. Пермь, Россия, 2016 г.; на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» – АПЭП-2016, г. Саратов, Россия, 2016 г.; на 6-й Международной научно-практической конференции ЭКСИЭ - 06 «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии», г. Екатеринбург, Россия, 19 апреля 2017 г., на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Россия, 16-19 мая 2017 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликована 81 научная работа общим объемом 79 п. л. В их числе 4 монографии и 19 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК. Получено 1 авторское свидетельство СССР и 13 патентов РФ на изобретения. Результаты исследований отражены в 3 отчетах по г/б НИР и отчете о проведении фундаментальных исследований в рамках выполнения базовой части государственного задания МОН РФ № 2014/77 по теме № 8.2654 «Исследование энергоэффективных импульсных линейных электромагнитных двигателей».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения общим объемом 361 страница, иллюстрирована 125 рисунками, 14 таблицами. Список использованной литературы содержит 233 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена и обоснована актуальность выполняемой работы, сформулированы цели и задачи, решаемые для их достижения, сформулирована научная новизна, практическая ценность результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность научных положений, рекомендаций и выводов, приведенных в работе.

В первой главе определены классификационные признаки импульсных технологий, использующих механическую энергию (Рисунок 1).

Любой технологический процесс характеризуется рядом параметров: производительность, удельные затраты энергии, материалов, труда, масса и габариты оборудования, себестоимость готового изделия (продукта) и многие другие.

К входным параметрам импульсного технологического процесса следует отнести энергию и частоту воздействия. Как правило, технологический объект является с энергетической точки зрения преобразователем энергии. При этом может быть получена недостижимая для других технологий концентрация энергии в самом объекте при точном ее дозировании в пространстве и во времени. Это особенно эффективно при процессах, в которых сочетается несколько видов взаимно дополняющих друг друга энергетических воздействий. Наиболее сильными интенсификаторами комбинированных процессов являются механические воздействия.

Технологические требования для отдельных импульсных процессов в виде диапазонов механической энергии и частот воздействия приведены в таблице 1.

Типичные для линейного электрического привода диапазоны рабочих перемещений и скоростей можно разбить на три группы.

1. Приводы с линейными синхронными и асинхронными двигателями, которые предназначены для использования в системах транспортировки на расстояния больше 1 м. При использовании напряжения питания сетевой частоты 50 Гц синхронная скорость движения обычно больше 3 м/с.



Рисунок 1 – Классификационные признаки технологий, использующих импульсную механическую энергию

Таблица 1 – Параметры импульсных технологических процессов

Область применения	Технологические операции	Энергия воздействия, Дж	Частота воздействия, Гц
Машиностроение	Динамическое упрочнение деталей	0,5...100	0,1...100
	Холодная штамповка	1...1000	1...25
	Клеймение	10...100	1...10
	Прокровка сварочных швов	1...50	1...50
Строительство	Бурение отверстий в бетонных стенах	1...15	25...50
	Разрушение бетонных перекрытий	15...50	15...25
	Погружение свай	$2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$	1...3
Поиски полезных ископаемых	Рудная селеноразведка, сейсморазведка нефти и газа, отбор керна	25...1000	1...10
Хим. промышленность	Виброперемешивание	100...1000	1...100
Специальные работы	Затяжка резьбы, разборка трубопроводов	10...300	1...5
	Забивка металлических анкеров в грунт	100...500	1...10
	Выпрессовка макетов	50...350	0,1...1
	Сборка траков гусеничных машин	30...200	0,1...2
Литейное производство	Уплотнение формовочной смеси	100...300	1...8
	Обрубка литников	100...1000	1...10
Сельское хозяйство	Водоподача	1...50	10...100
	Разрушение кольматанта в скважинах	20...100	1...15
	Сводообрушение в бункерах	50...300	0,1...3
	Перемешивание молока	30...200	0,3...1
	Дозирование и раздача кормов	20...200	1...3
	Погружение стержней и труб в грунт	50...1000	5...8
Электротехнология	Привод режущего инструмента при наплавке	10...30	15...30
	Привод для термосилового вытеснения металла	10...30	10...20
	Привод для получения зубчатого профиля при наплавке	10...20	10...35

2. Приводы с линейными шаговыми двигателями и двигателями постоянного тока. Электроприводы с двигателями постоянного тока, обычно создаются на максимальные перемещения от нескольких сантиметров до нескольких метров. Максимальная скорость перемещения рабочего органа обычно не превышает 10 м/с, так как на малом ходе сложно развить высокие скорости. Линейные шаговые двигатели имеют максимальный рабочий ход до 2-3 м. Они могут иметь шаг до нескольких десятков микрон, с точностью позиционирования до нескольких микрон. Их максимальная скорость, как правило, меньше 1 м/с.

3. Линейные приводы с электромагнитными (ЛЭМД) и электродинамическими (ЛЭДД) двигателями используются для создания перемещений от долей миллиметра до 0,1 – 0,3 м. Максимальная скорость движения якоря ЛЭМД обычно не превышает 15 м/с. Благодаря меньшей инерционности подвижных частей, в приводах с электродинамическими двигателями можно получать большие скорости движения, чем в приводах с ЛЭМД (до 20 м/с). Однако основной недостаток ЛЭДД - наличие обмотки на подвижном

якоре, предопределяет низкую надёжность и долговечность данного типа привода при использовании его в ударных машинах.

В линейных асинхронных приводах с частотным управлением диапазон регулирования скорости движения якоря определяется возможностями преобразователей частоты. КПД синхронных и асинхронных двигателей растёт с увеличением скорости, поэтому они используются, в основном, для создания высокоскоростного наземного транспорта. Применение синхронных и асинхронных двигателей в низкоскоростных регулируемых приводах малых перемещений нецелесообразно, так как требует значительных затрат на реализацию частотного управления.

Каждый из рассмотренных приводов имеет свои особенности, поэтому анализ их технических характеристик обычно не даёт однозначного ответа о том, какой из приводов будет наиболее эффективным в разрабатываемой машине. Следовательно, различные варианты требуется сравнить по какому-то обобщённому критерию, учитывающему основные технические характеристики привода. Одним из таких показателей является удельная сила тяги, представляющая собой отношение максимальной тяговой силы F привода к его собственной массе m (Таблица 2).

Таблица 2 – Предельные показатели линейных приводов

Тип привода	Частота ходов, Гц	Рабочий ход, мм	Тяговое усилие, Н	КПД, %	Удельная сила тяги, Н/кг
Электромеханический	300	70	45000	65	200
Пневматический	200	≥ 300	30000	11	650
Гидравлический	800	≥ 500	≥ 1300000	85	10000
Электромагнитный	600	2000	150000	80	3000
Электродинамический	15000	300	450000	20	20
Индукционный	200	не ограничен	71500	80	8
Индукционно-динамический	60	50	1530000	50	4000
Магнитоэлектрический	15000	30	1020	60	1
Магнестрикционный	30000	4	612250	65	50
Электрострикционный	15000	10	100	85	500

Проведём сравнительный анализ (Рисунок 2) двух наиболее эффективных типов приводов: *а* - гидравлического и *б* - электромагнитного (ЛЭМД).

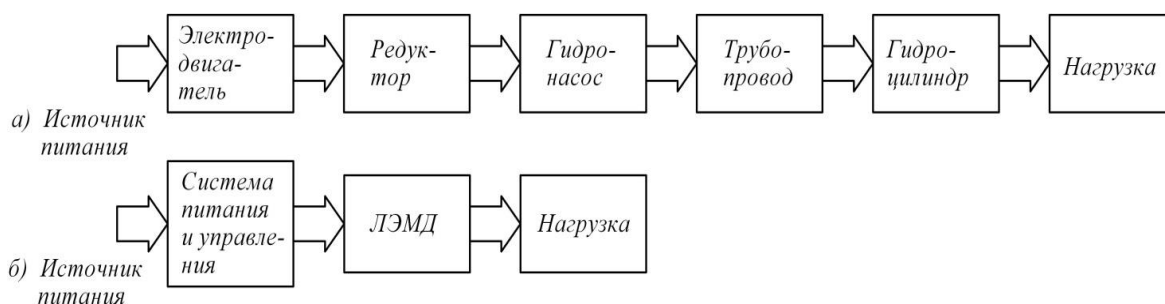


Рисунок 2– Схема энергопреобразования в системе: *а* - с гидроцилиндром; *б* - с ЛЭМД

Общий КПД: с гидроцилиндром (а) $\eta_o^Г = \eta_{эд} \cdot \eta_{рд} \cdot \eta_{гн} \cdot \eta_{тр} \cdot \eta = 0,48$;

с ЛЭМД (б) $\eta_o^{эм} = \eta_{упу} \cdot \eta_{эм} = 0,78$

Таким образом, установлены требования к значениям механической энергии и частот воздействия для широкого спектра технологических процессов, реализуемых ЛЭМД: механическая энергия $1 \dots 5 \cdot 10^4$ Дж, частоты $0,1 \dots 100$ Гц, доказана возможность использо-

вания ЛЭМД в составе оборудования для удовлетворения требований импульсных технологий.

Вторая глава посвящена оптимизации геометрических параметров магнитной системы (МС) цилиндрических импульсных ЛЭМД с интегральными функциями: с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем, с неферромагнитным направляющим корпусом (НФНК) и ферромагнитным (ФНК).

На рисунке 3 приведены расчетные конструктивные схемы магнитных систем (МС) импульсных ЛЭМД с продольным магнитным полем.

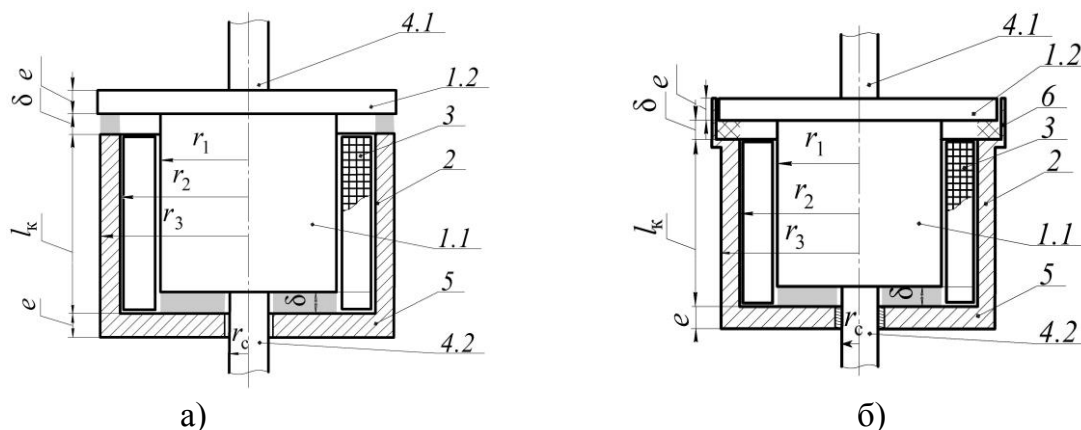


Рисунок 3– Расчётные конструктивные схемы МС импульсного ЛЭМД с неферромагнитным (а) и ферромагнитным (б) направляющим корпусом: 1 – якорь (1.1 – втяжная часть, 1.2 – притягивающаяся часть); 2 – статор (яро); 3 – обмотка возбуждения; 4 – направляющий стержень (4.1 – верхний, 4.2 – нижний); 5 – фланец; 6 – направляющий корпус

В качестве критерия оптимизации принят максимум отношения интегральной работы $A_{и}$ (магнитной энергии рабочих зазоров, преобразуемой в механическую работу A для энергетического режима $I = \text{const}$) ЛЭМД к объему его активных материалов V_d при заданных превышении температуры τ обмотки, токе I_τ и продолжительности включения ПВ.

С учетом известных допущений:

- а) сечение стали вдоль магнитной линии неизменно;
- б) магнитопровод при рабочем зазоре $\delta = 0$ насыщен, при начальном зазоре $\delta = \delta_H$ – не насыщен;

в) режим работы ЛЭМД повторно-кратковременный с относительной продолжительностью включения ПВ, при которой температура обмотки двигателя достигает её заданного превышения τ ;

г) потоки рассеяния при нулевом зазоре отсутствуют;

д) между обмоткой возбуждения и промышленной сетью включают устройство питания и управления (УПУ), с помощью которого во время движения якоря регулируется ток обмотки, а его эквивалентное значение I_τ соответствует допустимому превышению температуры. В результате реализуется магнитный цикл, изображённый на рисунке 4, причём $I_\tau = I_{\text{МАКС}}/k_a$, где k_a – коэффициент амплитуды; $I_{\text{МАКС}}$ – максимальное значение тока обмотки.

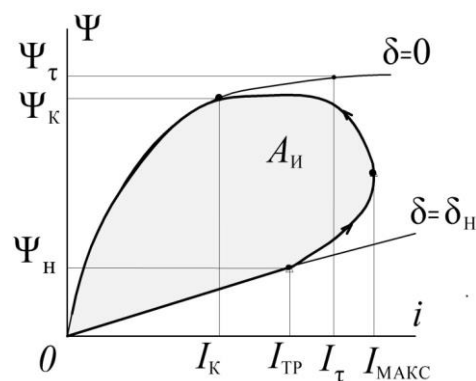


Рисунок 4– Магнитный цикл работы импульсного ЛЭМД

В итоге получена интегральная работа $A_{и}$, выраженная через электромагнитные нагрузки ЛЭМД и его размеры, определяемые через радиус якоря r_1 и относительные параметры: $x = r_2/r_1$ и длину обмотки $y = l_k/r_1$:

$$A_{и} = \Psi_{\tau} \cdot I_{\tau} - \int_0^{\Psi_{\tau}} Id\Psi - 0,5\Psi_{Н} \cdot I_{\tau} = \pi \cdot r_1^{7/2} \cdot B_{Б} \cdot y \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot b_2, \quad (1)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{2K_T \cdot k_{3М} \cdot \tau \cdot \alpha'}{\PiВ \cdot \rho_{\tau}}}; \quad b_1 = \sqrt{(x-1) \cdot [1 + (x-1)/y]}; \quad (2)$$

$$b_2 = B_{К*} \cdot (1-q) - 0,5 \cdot \Psi_{Н*}; \quad q = \frac{0,5 \cdot k_a (\alpha + \beta \cdot B_{\tau*}^4 / 3 + \zeta \cdot B_{\tau*}^8 / 5)}{\alpha + \beta \cdot B_{\tau*}^4 + \zeta \cdot B_{\tau*}^8}; \quad (3)$$

$\alpha' = 0,9 \dots 2,4$ Вт/м²К; $B_{Б} = 1$ Тл; $\Psi_{Н*} = 0,15 \dots 0,2$; $B_{К*} = B_{К} / B_{Б}$; $B_{К}$ – значение индукции магнитопровода при нулевом рабочем зазоре, соответствующим току I_{τ} ; $B_{К} \approx B_{\tau}$; $k_{3М}$, K_T – коэффициенты заполнения и теплоотдачи обмотки; ρ_{τ} – удельное сопротивление материала провода при превышении температуры τ ; кривая намагничивания аппроксимирована полиномом $H = \alpha \cdot B_* + \beta \cdot B_*^5 + \zeta \cdot B_*^9$.

Исследовано выражение критерия, называемого геометрическим фактором, в виде отношения интегральной работы $A_{и}$ к объему активных материалов:

$$\Gamma_V = \frac{A_{и}}{V_{Д}} = \frac{\sqrt{r_1} \cdot B_{Б} \cdot a_1 \cdot (B_{\tau*}(1-q) - 0,5\Psi_{Н*}) \sqrt{(x-1)(1 + (x-1)/y)}}{(x^2 + 1)(1 + 1/y)}. \quad (4)$$

Для максимального значения Γ_V установлен диапазон изменения параметра $x = 1,6 \dots 1,8$.

Так как интегральная работа обычно задается при проектировании, то, налагая дополнительное условие $A_{и} = \text{const}$, выражена относительная длина обмотки y . Исследованием на минимум объема активных материалов получена относительная длина обмотки:

$$y_{\text{опт}} = \left(\frac{x-1}{2} \right) \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{12-6x}{3(x-2) - (x-1)^2 + \left(1 - \frac{x-1}{2}\right) \cdot \sqrt{9\left(1 - \frac{x-1}{2}\right)^2 + 7\left(\frac{x-1}{2}\right)^2}} \right], \quad (5)$$

откуда установлен диапазон рациональных изменений $y = 2,9 \dots 3,3$.

С целью уменьшения стоимости проводниковых материалов выбрано значение $y = 3$ и определен основной размер ЛЭМД в виде:

$$r_1 = 7 \sqrt{\left(\frac{A_{и}}{3\pi B_{Б} \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot b_2} \right)^2}, \quad (6)$$

который используется при проектном расчете импульсного ЛЭМД.

При тех же условиях установлена аналитическая связь объема активных материалов двигателя и его составляющих с радиусом якоря и длиной магнитной системы. С целью уменьшения стоимости проводниковых материалов радиус r_1 следует выбирать на 5...10% больше расчетного.

В главе показано, что укорочение в осевом направлении магнитной системы повышает удельные силовые показатели ЛЭМД. Для двигателей продольного магнитного поля из условия одинакового объема активных материалов и магнитной индукции рабочих зазоров в конце рабочего хода якоря установлены соотношения между относительными значениями тягового усилия $F_{к*}$, плотности тока $j_{к*}$ и длиной обмотки y_k при укорочении.

Это позволило рекомендовать ограничивать при проектировании укорочение обмотки до уровня $y_k = 1,5$. Результаты экспериментального сравнения двух пар разработанных ЛЭМД с одинаковыми объемами активных материалов, приведенные в таблице 3, и математического моделирования в ПК Elcut для двигателей ПЭМ-0,8 и ПЭМ-0,8К подтвердили теоретические выводы. Установлено, что в результате укорочения продольной МС удельное тяговое усилие возрастает до 50%.

Таблица 3 – Сравнение ЛЭМД продольного поля с различной длиной МС

Параметры ЛЭМД (натурные образцы)	Сравниваемые ЛЭМД при $\delta_* = \delta/l_k = 0,43$			
	ПЭМ-0,3 базисный	ПЭМ-0,3К «короткий»	ПЭМ-0,8 базисный	ПЭМ-0,8К «короткий»
Интегральная работа $A_{и}$, Дж	24	26	36	39
Объем активн. материалов $V_{д} \cdot 10^5$, мм ³	5,44	5,61(103%)	12,2	12,9(106%)
Масса двигателя (меди) $m_{д}$ ($m_{М}$), кг	3,81(0,77)	3,95(0,62)	8,46(1,68)	9,03(1,47)
Удельное тяговое усилие $F_k / m_{д}$, Н/кг	879	1300	787	1196

Сравнение ЛЭМД поперечного поля с различной длиной МС, выполненное на примере импульсного ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем (Рисунок 5), привело к аналогичным результатам. Для укороченной в 1,5 раза по сравнению с базисной конструкцией МС при сохранении неизменным объёма $V_{д}$ активных материалов двигателя были получены с помощью математического моделирования статические тяговые характеристики (Рисунок 6).

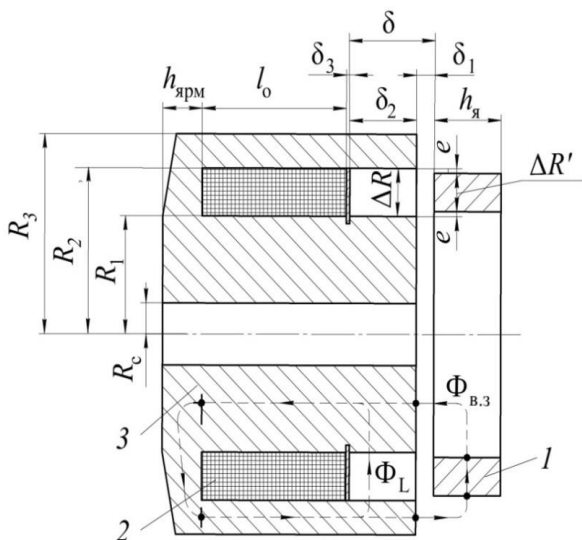


Рисунок 5 – Конструктивная схема МС ЛЭМД поперечного поля

Результаты сравнения представлены в таблице 4. Они показали возможность увеличения удельного тягового усилия до 30%. МС позволила объединить конструкцию двигателя и устройства удержания якоря на основе общего магнитопровода и общей МДС. Конструктивная схема МС интегрированного ЛЭМД с двумя рабочими зазорами представлена на рисунке 7.

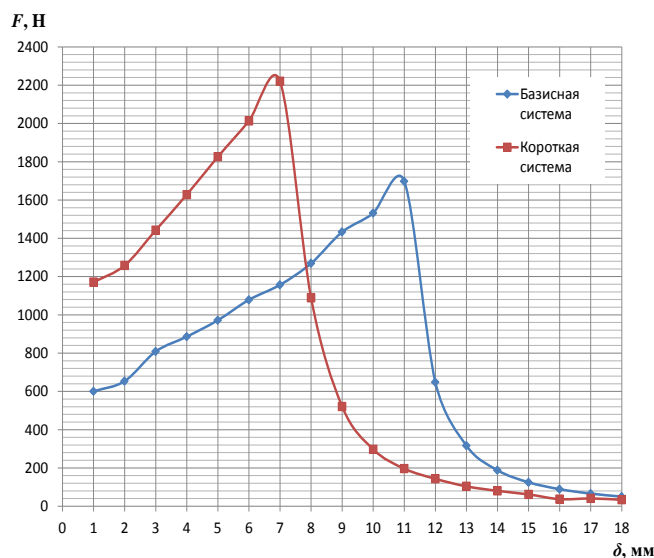


Рисунок 6 – Тяговые характеристики ЛЭМД поперечного поля с различной длиной МС

Таблица 4 – Сравнение ЛЭМД поперечного поля с различной длиной МС

Параметры ЛЭМД	Базисный $y = 1,76$	«Короткий» $y = 1,17$
$\delta_{*(1)} = \delta_1/l_0$	0,092 (7мм)	0,092 (4,7мм)
$A_{и(1)}$, Дж	2,61	3,32
$\delta_{*(2)} = \delta_2/l_0$	0,118 (9мм)	0,118 (6мм)
$A_{и(2)}$, Дж	9,87	9,39
A_{Σ} , Дж	12,48	12,71
$F_{\text{макс.}}$ *	1,0	1,30

В конструктивную схему интегрированного ЛЭМД (Рисунок 7) входят: 1- втяжная часть комбинированного якоря; 2 – цилиндрическая часть ФНК; 3 - нижний направляющий стержень; 4 - возвратная пружина; 5- ярмо; 6 - обмотка возбуждения; 7 – торцевая часть ФНК; 8 – регулировочная шайба; δ_v , δ_n и Δ – верхний, нижний рабочие и технологический зазоры соответственно; $\Phi_{шв}$, $\Phi_{\delta v}$, $\Phi_{ярм}$, $\Phi_{\delta n}$ и $\Phi_{шн}$ – магнитные потоки верхнего шунта, верхнего рабочего зазора, ярма, нижнего рабочего зазора и нижнего шунта соответственно

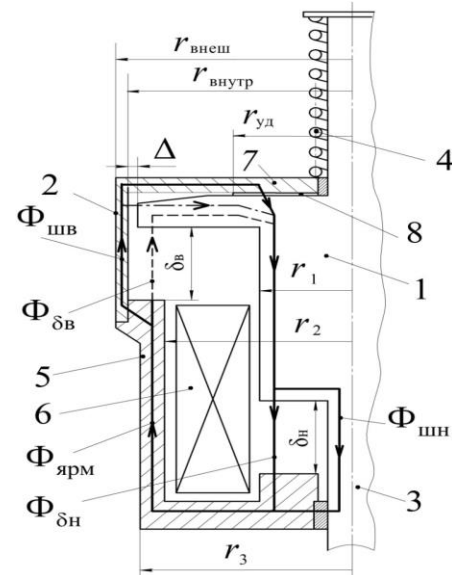


Рисунок 7 – Конструктивная схема интегрированного ЛЭМД

Получены выражения для оценки удерживающего усилия (7) в зависимости от величины удерживающей площадки $S_{уд}$ и сечения $S_{шв}$ верхнего магнитного шунта – ферромагнитного направляющего корпуса (ФНК) (Рисунок 8):

$$F_{уд*} = \frac{S_{шв*}^2}{2 \cdot S_{уд*} \cdot (1 - S_{шв*})^2} \quad (7)$$

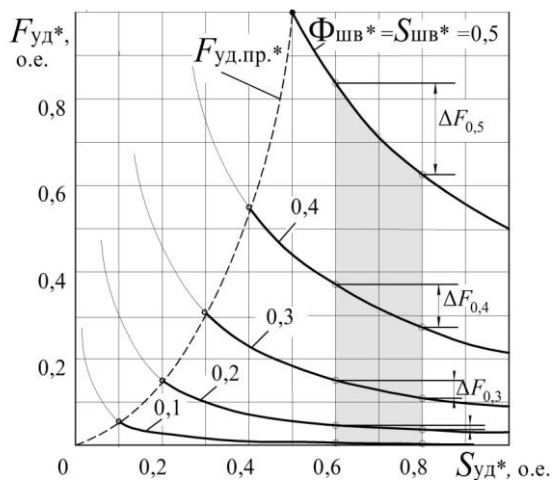


Рисунок 8 – Влияние конструктивных параметров интегрированного двигателя на усилие удержания якоря $F_{уд}$

сечения $S_{уд}$ ($S_{уд} > S_{шв}$), либо за счёт большей магнитной индукции насыщения материала площадки при том же сечении $S_{уд}$. По этим причинам при сочетании параметров, находящихся правее пунктирной линии, возможно регулирование усилия удержания за счёт использования, например, сменной шайбы 8.

Наиболее приемлемый диапазон изменения величины удерживающей площадки в этом случае следующий: при $\Phi_{шв*} = 0,2 \dots 0,4$ принимать $S_{уд*} \geq 0,2 \dots 0,4$. При этом усилие удержания $F_{уд*}$ будет изменяться в диапазоне от (0,05...0,15) до (0,2...0,55), что позволит за счёт статического нагружения двигателя увеличить энергию рабочего хода интегрированного ЛЭМД в 1,5...2 раза и обеспечить ее регулирование.

Полученные соотношения позволяют выбрать параметры ферромагнитного направляющего корпуса и сменной шайбы. Для более точного определения геометрии ФНК и удерживающей площадки потребуется учесть магнитные свойства материала магнитопровода.

На рисунке 8 пунктирной линией показано предельное удерживающее усилие, определяемое по формуле (8):

$$F_{уд.пр*} = \frac{0,5 \cdot S_{уд*}}{(1 - S_{уд*})^2} \quad (8)$$

Сочетание параметров $F_{уд*}$, $S_{шв*}$ и $S_{уд*}$, которое соответствует нахождению их левее пунктирной линии (Рисунок 8), является недопустимым, поскольку там происходит одновременно насыщение ФНК и удерживающей площадки, что приводит к снижению $F_{уд}$. Поэтому желательно, чтобы удерживающая площадка насыщалась позднее ферромагнитного направляющего корпуса, то есть при больших индукциях и соответственно потоках. Этого можно достичь либо за счёт завышения сечения

Например, для стали Ст.3 получено расчетное выражение магнитной индукции B_0 ФНК при отрыве якоря, и расчет подтвержден численным экспериментом (Таблица 5, Рисунок 9).

Таблица 5 – Сравнение результатов численного эксперимента и расчета

Исходные данные: $w \cdot I = 1470$ А; $S_{ш.в*} = 0,1$; $\delta = 20$ мм; сталь Ст.3.	
Численный эксперимент (ELCUT)	Расчет
B_0 (поз. 3) = 1,82 Тл $B_{я}$ (поз. 1) = 0,21 Тл, $B_{я}$ (поз. 2) = 0,29 Тл	$B_0 = 1,77$ Тл

Начало отрыва – при $B_{я}/B_0 = 0,16 \dots 0,2$.

Таким образом, на основе кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания материала магнитопровода интегрированного ЛЭМД и его ФНК получено выражение магнитной индукции ярма $B_{я}$ двигателя в момент начала движения якоря. По значению этой индукции нетрудно рассчитать усилие удержания, которое становится равным начальному тяговому усилию.

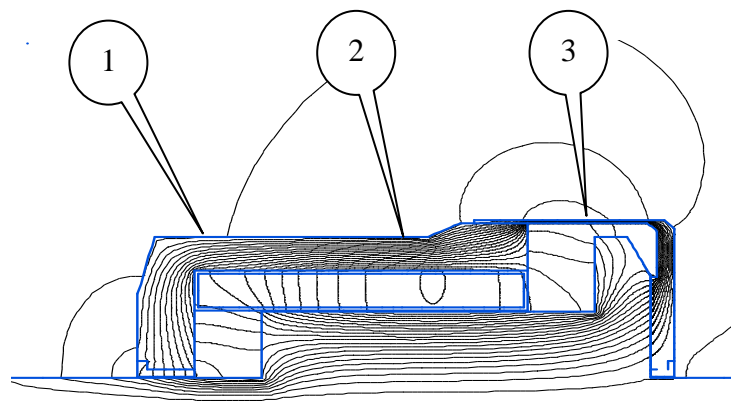


Рисунок 9 – Картина поля интегрированного ЛЭМД при отрыве якоря

В третьей главе рассмотрена энергетическая структура электромеханического преобразователя (ЭМП) электромагнитного типа циклического действия, представленная тремя последовательно включенными подсистемами (ПС): электрической ПС, магнитной ПС и механической ПС (Рисунок 10) и показана необходимость концентрации в рабочих зазорах магнитной энергии на этапе ее электромагнитного преобразования.

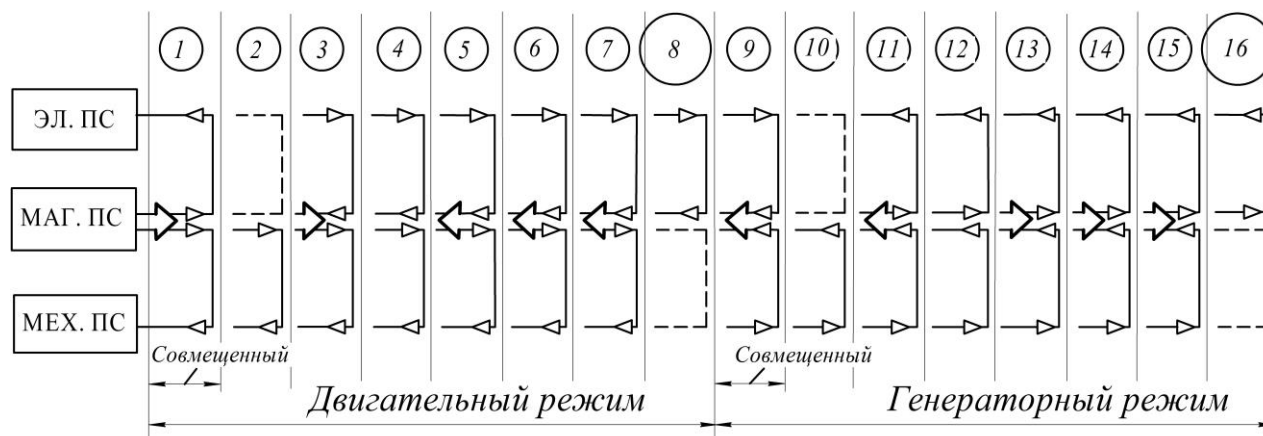


Рисунок 10– Энергетические структуры ЭМП электромагнитного типа

В таком ЭМП за время рабочего цикла осуществляется сначала электромагнитное (между электрической и магнитной подсистемами), а затем электромеханическое (между магнитной и механической подсистемами). Относительно магнитной ПС, являющейся центральной по отношению к двум другим подсистемам, выявлено 16 различных сочетаний взаимодействия потоков энергии между этими подсистемами – 16 энергетических режимов.

Режимы 8 и 16 соответствуют режимам возбуждения ЭМП, то есть только электромагнитного преобразования энергии без дальнейшего электромеханического преобразо-

вания, когда рабочая точка перемещается в плоскости «потокосцепление - ток» по магнитной характеристике, соответствующей неизменному начальному рабочему зазору. С режима электромагнитного преобразования начинаются остальные 14 режимов, предшествующих электромеханическому преобразованию энергии в ЭМП, из них режимы 1...7 являются двигательными, а режимы 9...15 – генераторными.

Очевидно, что электромагнитное преобразование энергии на этапе трогания якоря коренным образом влияет на концентрацию магнитной энергии в рабочих воздушных зазорах импульсного ЛЭМД.

При начальном рабочем зазоре δ_n МС двигателя, как правило, не насыщена. Поэтому его вебер-амперная характеристика будет линейной и образует с осью тока угол Θ_n (Рисунок 11), который зависит от характеристик магнитной системы, то есть является обобщенным режимно-конструктивным параметром. Точка пересечения М определит предельную магнитную энергию $W_{м.пред*}$, запасаемую в рабочих зазорах двигателя на этапе трогания (на рисунке вся заштрихованная площадь), механическая работа показана заливкой.

С помощью параметра Θ_n , учитывающего количество рабочих зазоров и ток трогания, установлено, что с уменьшением Θ_n , например, от 45° до 20° , максимально возможная величина накопленной на этапе трогания магнитной энергии возрастает в 3,6 раза (Рисунок 12). Поэтому появляются предпосылки ожидать увеличения удельной энергии рабочего хода импульсных ЛЭМД с ростом количества рабочих зазоров в конструкции МС.

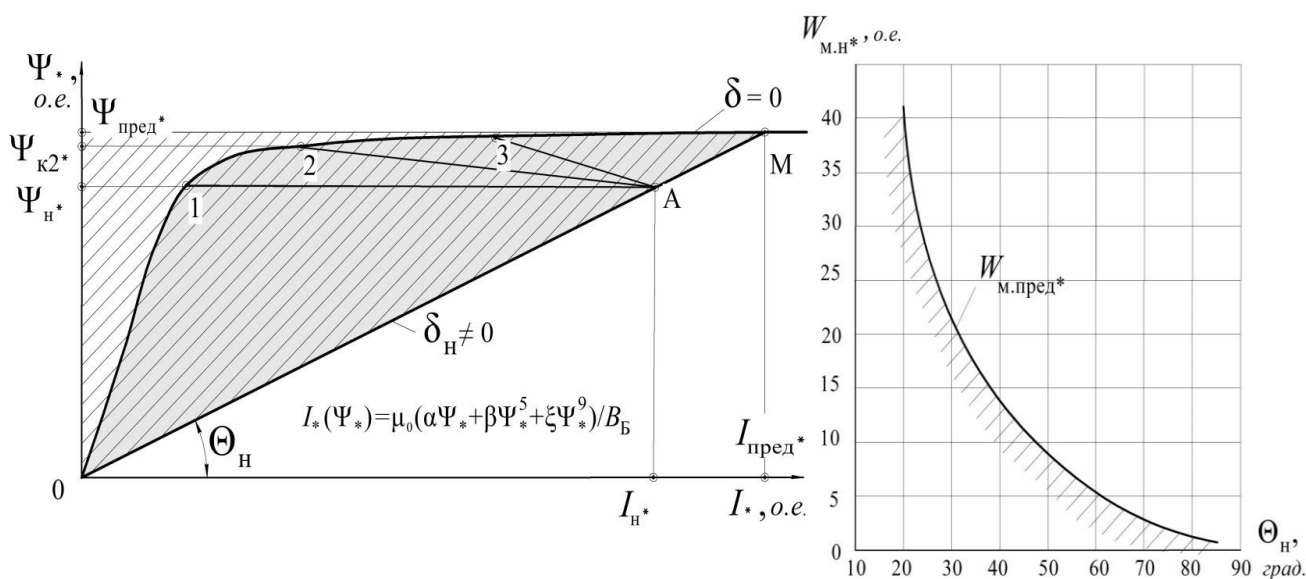


Рисунок 11 – Магнитные характеристики импульсного ЛЭМД при различных зазорах и предельная магнитная энергия, запасаемая на этапе трогания (заштрихована)

Рисунок 12 – Граница $W_{м.пред*}$ и область возможных значений магнитной энергии зазоров $W_{м.н*}$, накопленной на этапе трогания якоря

Для конкретной оценки предельной величины механической работы $A_{пред*}$ импульсного ЛЭМД необходимо учитывать кривую намагничивания материала его магнитопровода. Например, для магнитопровода из стали Ст.3 $A_{пред*}$ будет:

$$A_{ПРЕД*} = \frac{0,5}{L_{Н*}} \sqrt{-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - Q}} - 0,5 \frac{\alpha + \frac{\beta}{3} \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - Q} \right) + \frac{\xi}{5} \left(-\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} Q} \right)^2}{\alpha + \beta \cdot Z + \xi \cdot Z^2}, \quad (9)$$

$$\text{где } Q = \frac{\alpha}{\xi} - \frac{(\alpha + \beta \Psi_{\text{ПРЕД*}}^4 + \xi \Psi_{\text{ПРЕД*}}^8)}{\xi L_{\text{H*}}};$$

$$Z = -\frac{\beta}{2\xi} + \sqrt{\frac{\beta^2}{4\xi^2} - \frac{1}{\xi} \left(\alpha - \frac{B_B}{\mu\mu_0 L_{\text{H*}}} \right)}, \quad L_{\text{H*}} = \text{tg}\Theta_{\text{H}}.$$

Исследование зависимости $A_{\text{пред*}}$ от параметра Θ_{H} показало, что одноззорные конструкции с небольшой кратностью изменения индуктивности m ($\Theta_{\text{H}} > 60^\circ$), не обеспечивают необходимого запаса магнитной энергии в рабочих зазорах (Рисунок 13).

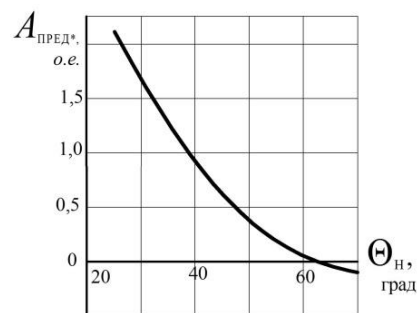


Рисунок 13 – Влияние Θ_{H} на предельную механическую работу

В четвертой главе исследуются режимы электромеханического преобразования. На энергетической плоскости $\Psi - i$ представлены секторы и границы между ними, соответствующие шестнадцати энергетическим режимам импульсного ЭМП электромагнитного типа (на рисунке 14 и далее режимы указаны в кружочках).

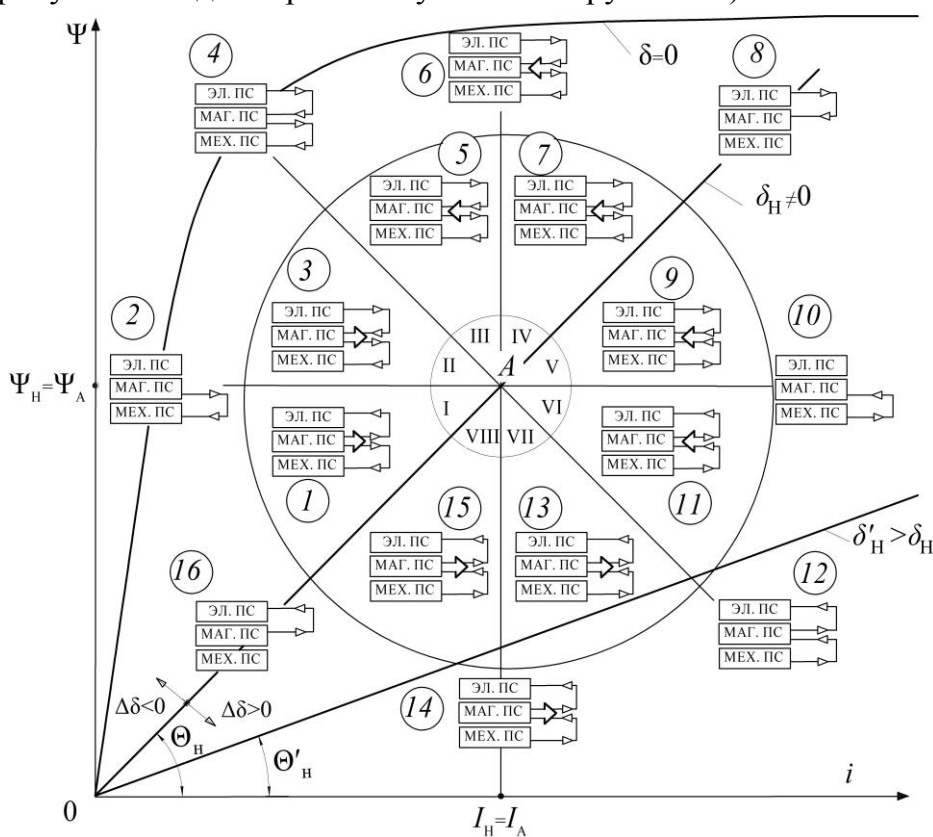


Рисунок 14 – Энергетические режимы импульсного ЛЭМД

Классификация энергетических режимов электромагнита была впервые представлена в работе Тимошенко Е.М. и Ряшенцева Н.П., где было отмечено, что энергетические режимы работы электромагнита в качестве электромагнитного двигателя, используемого для совершения механической работы, отличаются друг от друга степенью восстановления магнитной энергии при движении якоря. Эта мысль на протяжении многих лет не находила своего развития применительно к теории энергопреобразования электромагнита. Однако еще в тридцатые годы прошлого века инженером Семичовым Е.Я, учеником академика В.Ф. Миткевича, был предложен критерий в виде коэффициента восстановления магнитной энергии при движении якоря электромагнита, который, на наш взгляд, выступает как инструмент для разграничения энергетических режимов электромагнитного двигателя. В последующих наших работах эта идея применения указанного критерия бы-

ла развита и использована для исследования процессов энергопреобразования импульсного ЛЭМД, коэффициент восстановления k_B используется для анализа двигательного режима, а коэффициент ослабления k_{oc} – для генераторного:

$$k_B = \frac{dW_{M,ДВ}}{dA} \approx \frac{\Delta W_{M,ДВ}}{\Delta A} \Big|_{\Delta A > 0, \Delta \delta < 0}, \quad k_{oc} = \frac{dW_{M,ДВ}}{dA} \approx \frac{\Delta W_{M,ДВ}}{\Delta A} \Big|_{\Delta A < 0, \Delta \delta > 0} \quad (10)$$

Определив диапазоны изменения коэффициентов восстановления и ослабления, удалось разграничить режимы электромеханического преобразования (Таблица 6)

Таблица 6 – Режимы электромеханического преобразования

Режимы	1	2	3	4	5	6	7
k_B ($\Delta\delta < 0$)	$-\infty < k_B < -1$	$k_B = -1$	$-1 < k_B < 0$	$k_B = 0$	$0 < k_B < 1$	$k_B = 1$	$+\infty > k_B > 1$
Режимы	9	10	11	12	13	14	15
k_{oc} ($\Delta\delta > 0$)	$-\infty < k_{oc} < -1$	$k_{oc} = -1$	$-1 < k_{oc} < 0$	$k_{oc} = 0$	$0 < k_{oc} < 1$	$k_{oc} = 1$	$+\infty > k_{oc} > 1$

Для сравнения режимов 1...7 при ненасыщенной МС (Рисунок 15.) использованы следующие критерии: механическая работа A (Рисунки 16, 17); остаточная магнитная энергия W_{MO} ; магнитный КПД η_M (Рисунок 18).

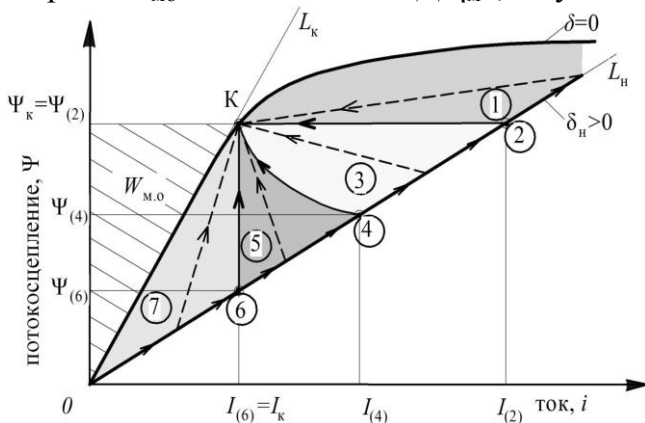


Рисунок 15 – Энергетические режимы (1...7) работы импульсного ЛЭМД при $W_{MO} = \text{const}$

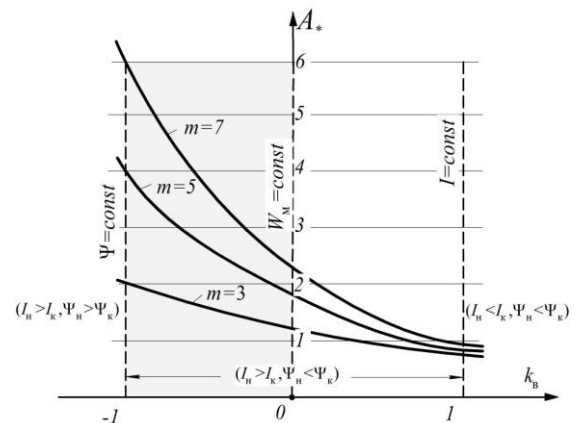


Рисунок 16 – Влияние коэффициента восстановления на механическую работу импульсного ЛЭМД при $W_{MO} = \text{const}$

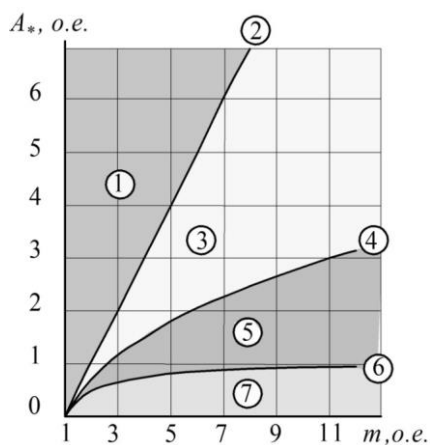


Рисунок 17 – Механическая работа импульсного ЛЭМД, работающего по энергетическим режимам 1...7, при $W_{MO} = \text{const}$

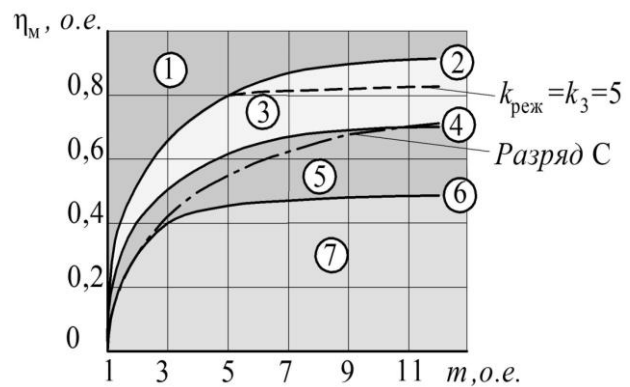


Рисунок 18 – Зависимости магнитного КПД η_M от кратности изменения индуктивности m ЛЭМД, работающего по энергетическим режимам 1...7

Сравнение режимов ведется при неизменной остаточной магнитной энергии.

Для любого из режимов 2...7 механическая работа будет:

$$A = 0,5 \cdot I_{н(реж)}^2 \cdot L_n \cdot \frac{(m-1)}{k_{(реж)}}, \text{ где } m = L_k/L_n; \quad k_{(реж)} = I_{н(реж)}/I_k. \quad (11)$$

Из графиков следует, что лучшими энергетическими режимами, по которым функционируют импульсные ЛЭМД, будут режимы, при которых коэффициент восстановления находится в диапазоне $-1 \leq k_b \leq 0$. Ими являются режимы при неизменном потокосцеплении (режим 2), либо при незначительном росте последнего при движении якоря и снижении тока обмотки двигателя (режимы 2 и 3).

Эти режимы соответствуют энергопреобразованию, происходящему преимущественно за счет предварительно накопленной магнитной энергии и при минимуме потребляемой в процессе движения якоря электрической энергии от источника. Это позволяет радикально повысить удельную механическую работу импульсного ЛЭМД. Идея предварительного накопления магнитной энергии на этапе трогания была впервые высказана профессором Угаровым Г.Г. и далее развита в последующих работах. Величина механической энергии, накапливаемой в рабочих зазорах, включенных в магнитную цепь двигателя последовательно, растет с увеличением числа зазоров. По сравнению, например с режимом $I=\text{const}$ (режим 6) функционирование импульсного ЛЭМД по лучшему из режимов (режим 2, $\Psi=\text{const}$) позволяет практически в 6 раз повысить механическую работу двигателя применительно к трехзазорной магнитной схеме, в 4 раза – для двухзазорной и в 2 раза – для однозазорной.

Приняв для импульсных ЛЭМД продольного магнитного поля зависимость индуктивности обмотки от перемещения в виде $L(x) = \frac{a}{x_k - x + \delta_0(m)}$, получены обобщенные

аналитические выражения электромеханических характеристик таких двигателей, работающих по режимам 2...7, для тока $i(x)$ (рис. 19), тягового усилия $F_3(x)$ (Рисунок 20), скорости якоря $V(x)$ (Рисунок 21) и механической мощности $P_{\text{мех}}(x)$ (Рисунок 22).

$$i(x) = I_{\text{тр(реж)}} \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{0,5 \cdot (1-k_b)} \quad (12) \quad F_3(x) = \frac{a \cdot I_{\text{тр(реж)}}^2}{2 \cdot x_k^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{1+k_b}} \quad (13)$$

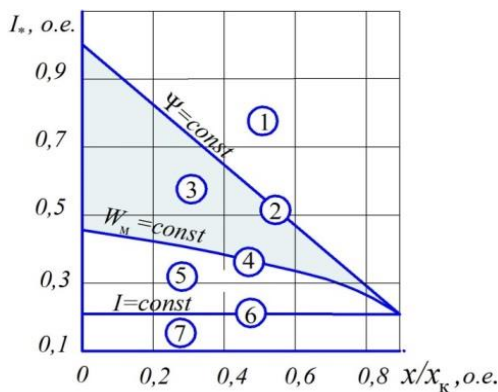


Рисунок 19 – Границы и области изменения тока обмотки возбуждения от перемещения якоря импульсного ЛЭМД для режимов (1)...(7) и $m=4,45$

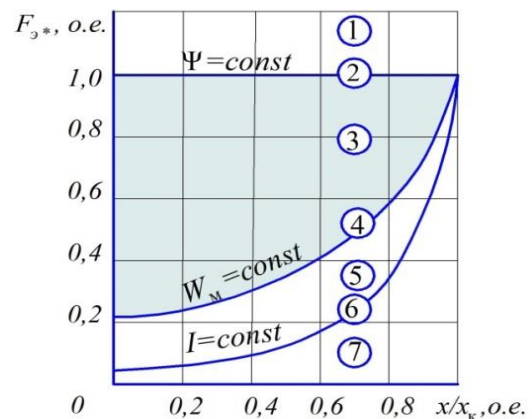


Рисунок 20 – Границы и области изменения тягового усилия от перемещения якоря импульсного ЛЭМД для режимов (1)...(7) и $m=4,45$

$$V(x) = I_{\text{тр(реж)}} \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_k \cdot k_B} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{-k_B} - 1 \right)}, \quad (14)$$

где $k_B \neq 0$;

$$V(x)_{(4)} = I_{\text{тр(4)}} \cdot \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_k} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)}}, \quad (15)$$

где $k_B = 0$

$$P_{\text{мех}}(x) = \frac{I_{\text{тр(реж)}}^3}{2 \cdot \left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{1+k_B}} \cdot \sqrt{\frac{a^3}{m_a \cdot x_k^5 \cdot k_B} \cdot \left(\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)^{-k_B} - 1 \right)}, \quad (16)$$

где $k_B \neq 0$;

$$V(x)_{(4)} = I_{\text{тр(4)}} \cdot \sqrt{\frac{a}{m_a \cdot x_k} \cdot \ln \frac{1}{\left(\frac{m}{m-1} - \frac{x}{x_k} \right)}}, \quad (17)$$

где $k_B = 0$

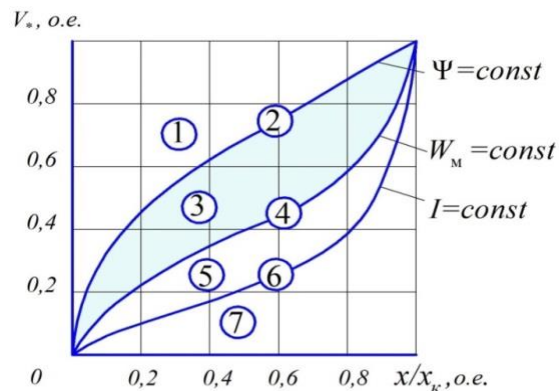


Рисунок 21 – Границы и области изменения скорости якоря ЛЭМД для режимов (1)...(7) и $m=4,45$

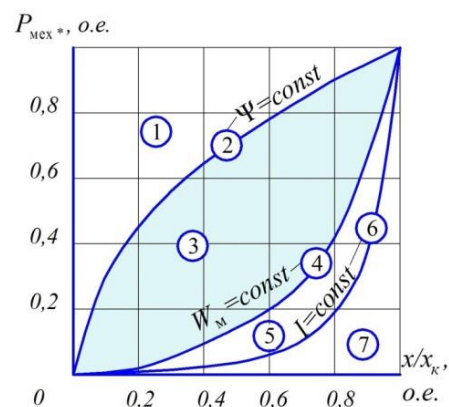


Рисунок 22 – Границы и области изменения механической мощности ЛЭМД для режимов (1)...(7) и $m=4,45$

Анализ полученных выражений электромеханических характеристик показывает, что формы тока и усилия на интервале движения якоря (Рисунки 19, 20) влияют на скорость его движения (Рисунок 21), что в свою очередь влияет на кинетическую энергию двигателя. Из рисунков 20 и 21 следует, что режимы 4...7 характеризуются значительными изменениями тягового усилия по ходу движения якоря. Это приводит к сильному изменению скорости якоря и, как следствие, – к значительной нестабильности энергии при изменении рабочего хода. Лишь режимы 3 и 2 обладают не только большими начальными скоростями, но и большей стабильностью энергии рабочего хода.

В главе показано, что относительные изменения энергии удара ΔA_{y*} , характеризующие её нестабильность, на участке движения в заключительной стадии рабочего хода, которая составляет обычно $(0,85...0,9) \cdot x_k$, для режимов 6, 4 и 2 соответственно будут:

$$\Delta A_{y(x)(6)*} = 60\%; \quad \Delta A_{y(x)(4)*} = 17\% \quad \text{и} \quad \Delta A_{y(x)(2)*} = 7\%. \quad (18)$$

Полученные значения свидетельствуют о низкой стабильности энергии рабочего хода ударной машины для режима 6 ($I = \text{const}$). Наоборот, режим 2 ($\Psi = \text{const}$) обладает лучшими показателями по стабильности энергии удара, что освобождает этот режим от дополнительных мероприятий по стабилизации A_y , повышает качество технологических операций, например, прессования, клеймения.

В отличие от ударной нагрузки компрессорная или насосная нагрузка создаёт значительное противодействующее усилие, как в начале рабочего хода, так и по ходу движения якоря. Поэтому для таких машин наиболее целесообразен режим 2 ($\Psi = \text{const}$) с по-

вышенным значением начального тягового усилия. Повышенное значение начального тягового усилия (Рисунок 20) способствует еще и лучшему быстрдействию привода.

Таким образом, энергетические режимы 2 и 3 обеспечивают высокую стабильность энергии удара. Применение энергетического режима 2 ($\Psi = \text{const}$) по сравнению с режимом 6 ($I = \text{const}$) повышает быстрдействие электромагнитного привода за счет снижения времени рабочего хода до 80%.

Пятая глава посвящена расчету параметров импульсных ЛЭМД на основе принципа взаимности, являющегося одним из обобщенных методов научного познания физических процессов в динамических системах. По этому принципу в качестве исходных данных используются статические тяговые характеристики $F_{\text{ст}}(\delta)$ импульсного ЛЭМД, противодействующие характеристики $F_{\text{п}}(\delta)$ для определения энергии удара ЛЭМД по его интегральной работе $A_{\text{и}}$ и работе $A_{\text{п}}$ по преодолению полезной нагрузки. При этом считаем, что характеристики $F_{\text{ст}}(\delta)$ у используемых в приводе импульсных машин неизменны на большей части хода якоря, электромагнитные усилия после включения обмоток двигателя возникают без запаздывания.

На основании принципа взаимности для электромеханических систем кинетическая энергия движущихся частей $A_{\text{к}}$ импульсного ЛЭМД должна равняться энергии $A_{\text{е}}$, связанной с противодействующими ЭДС:

$$A_{\text{к}} = A_{\text{е}} = 0,5 \cdot (A_{\text{и}} - A_{\text{п}}). \quad (19)$$

Выражение (19), предложенное А.В. Гордоном и А.Г. Сливинской, справедливо, если пренебречь потерями от перемагничивания и вихревых токов, а также потерями энергии, связанными с преодолением сил трения, то есть считать, что избыточная сила целиком участвует в ускорении движущихся частей импульсного ЛЭМД.

Нами установлено обобщенное соотношение между энергией рабочего хода (энергией удара) и интегральной работой применительно к каждому энергетическому режиму, по которому работает импульсный ЛЭМД:

$$A_{\text{к}} = A_{\text{у}} = \eta_{\text{м}} \cdot (A_{\text{и}} - A_{\text{п}}). \quad (20)$$

В этом соотношении в отличие от известной формулы (19) с коэффициентом 0,5 используется магнитный КПД $\eta_{\text{м}}$ в качестве коэффициента пропорциональности. Его величина зависит от энергетического режима работы двигателя (Рисунок 23) и изменяется в диапазоне $\eta_{\text{м}} \in (0 \dots 1)$. В дальнейшем формулу (20) используем для детального анализа и сравнения энергетических и динамических характеристик различных конструктивных схем электромагнитных машин.

На якорь импульсного ЛЭМД кроме детерминированной электромагнитной силы могут действовать сторонние силы. К источникам сторонней механической энергии относятся: потенциальная энергия

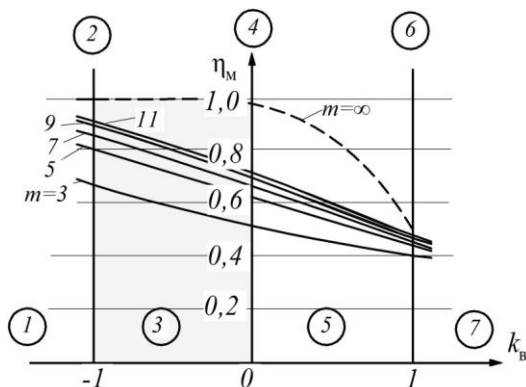


Рисунок 23 – Влияние коэффициента восстановления магнитной энергии на магнитный КПД при фиксированных значениях кратности индуктивности

буферного устройства (электромагнитные молотки и перфораторы); механическая энергия возврата якоря в период х.х.; механическая энергия, создаваемая отдельными секциями обмоток, или двигателями другой, неэлектрической природы; кинетическая энергия отскока от обрабатываемой среды.

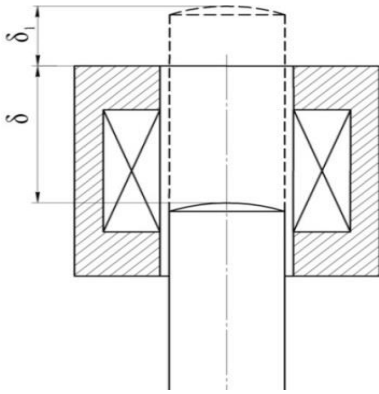


Рисунок 24 – Конструктивная схема однообмоточного молота двойного действия

Применив взаимные соотношения для схемы однообмоточного молота двойного действия (рис. 24), удалось установить, что если начальная скорость якоря будет больше некоторой предельной, то возникает генераторный эффект, при котором накопленная в рабочих зазорах магнитная энергия лишь частично преобразуется в механическую энергию, а другая часть магнитной энергии $A_{y^*}, o.e.$ возвращается в источник (Рисунки 25, 26 б).

Этот нежелательный энергетический режим показан на графиках пунктирными линиями.

С помощью взаимных соотношений получены энергетические характеристики мощных многосекционных импульсных электромагнитных машин (Рисунок 26), таких как молоты, пресс-молоты, прессы. Они так же подтвердили результаты и для рассмотренного выше однообмоточного молота двойного действия.

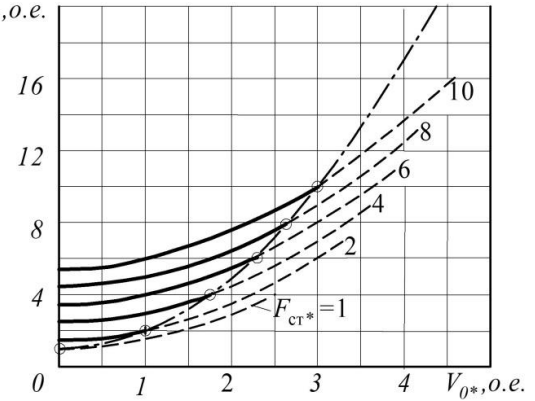


Рисунок 25 – Влияние начальной скорости на энергию удара молота

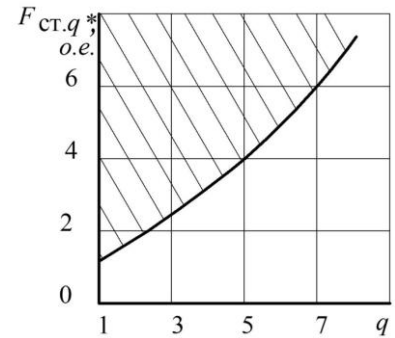
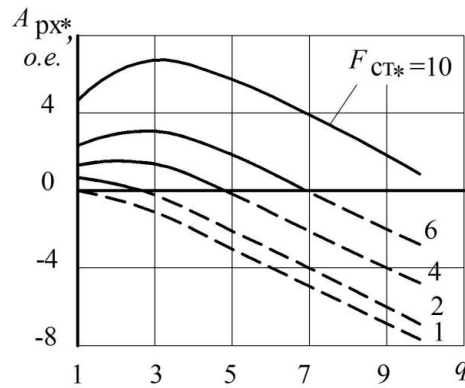
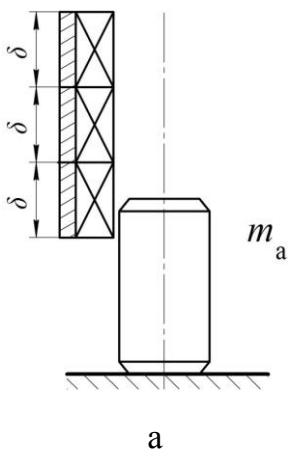


Рисунок 26– Влияние числа секций q многосекционной ударной машины двойного действия (а) на энергию рабочего хода (б) и на минимальное статическое тяговое усилие (в)

Для обеих конструктивных схем ударных машин (Рисунки 24, 26) впервые установлены границы генераторного эффекта в период рабочего хода. Причем ввод механической энергии в электромеханическую систему может вызвать как снижение тягового усилия и механической работы, так и их повышение.

Для одной из распространенных конструктивных схем однообмоточных ЛЭМД с пружинным накопителем получены не только энергетические, но и динамические характеристики (Рисунок 27). Такая схема двигателей используется в приводе высоковольтных вакуумных выключателей, в приводе прессового и штамповочного оборудования, ударных машин для погружения в грунт металлических электродов. Ее обязательным условием является безударный холостой ход, при котором конечная скорость якоря близка к нулю.

лю. Этому соответствует соотношение между тяговым усилием F_{CT} , жесткостью накопительной пружины c и усилием ее начального поджатия F_0 : $F_{CT*} = \frac{F_{CT}}{m_a \cdot g} = 1 + 0,5c_* + F_{0*}$.

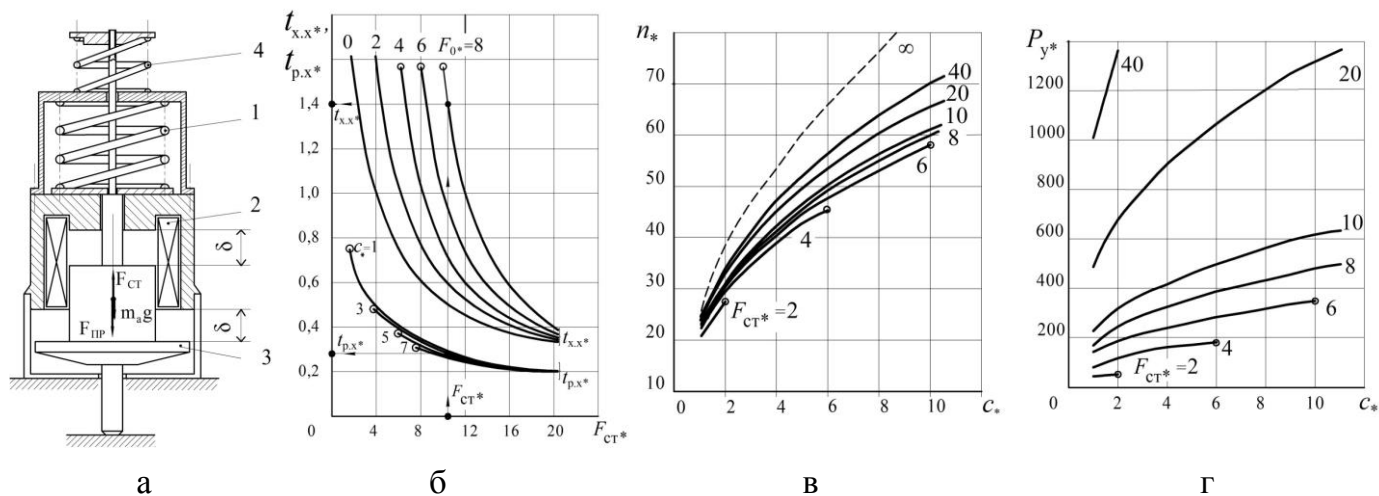


Рисунок 27– Влияние жесткости c накопительной пружины (поз.1 на рис. а) и усилия F_{CT} на времена холостого и рабочего ходов (б), на частоту ходов якоря (в) и ударную мощность (г)

Аналогично предыдущей конструктивной схеме были получены энергетические и динамические характеристики однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной (Рисунок 28). В этих конструктивных схемах однообмоточной машины снижения тягового усилия и энергии рабочего хода вследствие генераторного эффекта не наблюдается, так как его относительное тяговое усилие значительно и превышает 20...100 единиц.

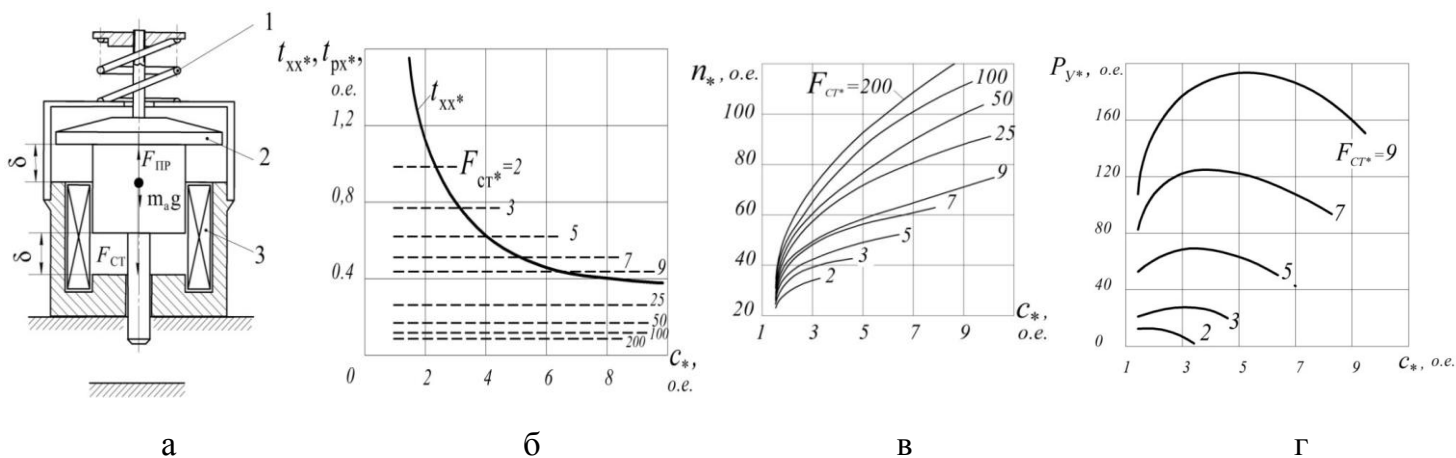


Рисунок 28 – Влияние жесткости c возвратной пружины (поз.1 на рис. а) и усилия F_{CT} на времена холостого и рабочего ходов (б), на частоту ходов якоря (в) и ударную мощность (г)

В шестой главе рассмотрены рабочие процессы импульсных ЛЭМД с повышенными силовыми и энергетическими показателями.

В главе 3 была обоснована необходимость концентрации магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД на этапе трогания якоря. По этому способу к якорю двигателя на этапе трогания приложено усилие удержания $F_{уд}(x)$, препятствующее движению якоря до момента достижения током величины, которая определяет начальное тяговое усилие. Теоретические и экспериментальные исследования импульсного ЛЭМД с устройством удержания якоря, выполненные на специально разработанных стендах, показывают,

что за счет применения этого устройства, встроенного в конструкцию двигателя, можно радикально улучшить его как динамические, так и энергетические показатели.

На рисунке 29 представлены зависимости, энергии удара A_y и КПД η импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 с встроенным устройством удержания.

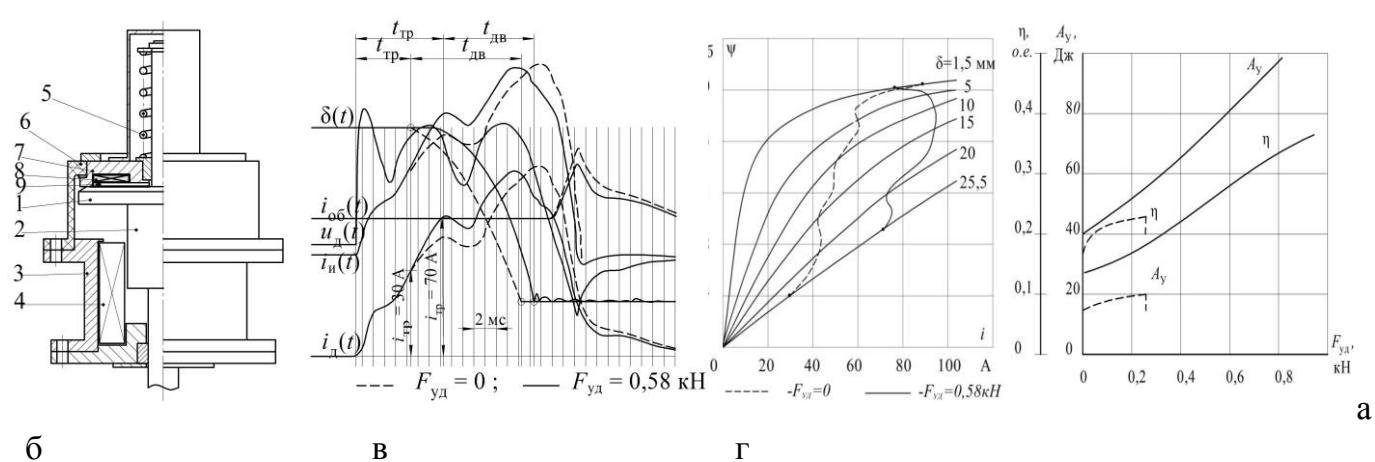


Рисунок 29 – Конструкция импульсного ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 усилием 8 кН с встроенным устройством удержания (а), типовые осциллограммы рабочего хода (б), экспериментальные энергетические диаграммы (в) и его энергетические показатели (г)

Рост КПД и энергии удара с ростом нагружения статическим противодействующим усилием происходит по тем же причинам, что и аналогичный рост для классических электрических двигателей при росте их нагрузки. Для двигателя пресса ПЭМ-0,8 устройство удержания якоря увеличило энергию удара и КПД в два раза. Его удельная энергия удара достигла 9Дж/кг. Результаты эксперимента представлены в таблице 7.

Таблица 7 –Характеристики импульсного ЛЭМД с встроенным устройством удержания

Магнитный цикл	Энергетические характеристики и показатели ЛЭМД типа ПЭМ-0,8 при потребляемой за цикл энергии $W_{эл} = 285$ Дж и трехфазном питании				
	Механическая работа A , Дж	Магнитный КПД η_m	Начальная магнитная энергия $W_{мн}$, Дж	Энергия удара A_y , Дж	КПД η , %
$F_{уд} = 0$	54	0,75	6,1	40,1	14
$F_{уд} = 0,58$ кН	92	0,85	33,1	80,5	28

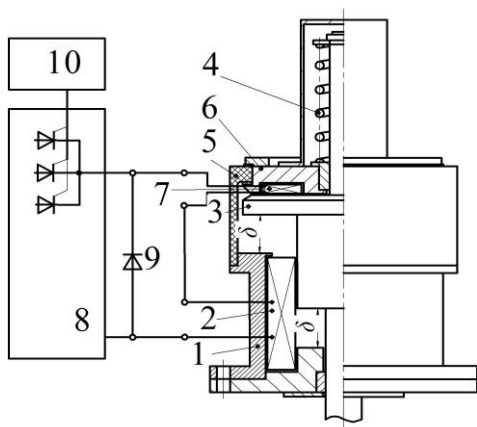


Рисунок 30 –Реализация способа передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры ЛЭМД

Для подобных ЛЭМД усилием до 100 кН максимальное усилие удержания составляет от 5 до 20 % номинального усилия. Наибольшая эффективность концентрации магнитной энергии достигается в диапазоне от 50 до 90 % максимального усилия удержания.

Поскольку в импульсных ЛЭМД кроме рабочих зазоров существуют еще и нерабочие, в которых так же запасается магнитная энергия, обусловленная потоками рассеяния, то ее целесообразно использовать полезно. Поэтому нами предложен способ передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД, который реализован последовательным соединением обмоток возбуждения 2 и удержания 7, шунтированных обратным диодом 9 (Рисунок 30).

При таком использовании магнитной энергии, связанной с потоками рассеяния, результаты моделирования (Рисунок 31) показали возможность увеличения механической работы двигателя на 30...35 %, а при использовании магнитной энергии устройства удержания якоря для такого среднеходового электромагнитного двигателя – возможность дополнительного увеличения его механической работы еще на 1...1,5%, а для короткоходового двигателя – на 4...6%.

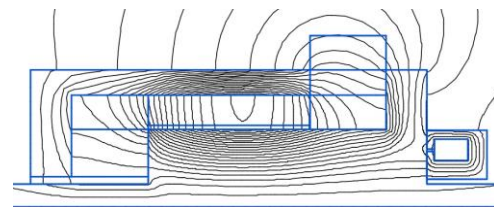


Рисунок 31–Картина магнитного поля импульсного ЛЭМД при последовательном соединении обмоток возбуждения и удержания

В седьмой главе рассмотрены конструктивные и схемные решения технологического оборудования с ЛЭМД. В настоящее время особую значимость обретают ресурсосберегающие технологии, основанные на использовании высококонцентрированных потоков энергии, среди которых доминируют процессы плазменной (дуговой) наплавки (Рисунок 32). На рисунке 33 показаны конструктивные схемы обработки по принципу безотходного терморезания, например, при восстановлении колесной пары железнодорожного вагона.

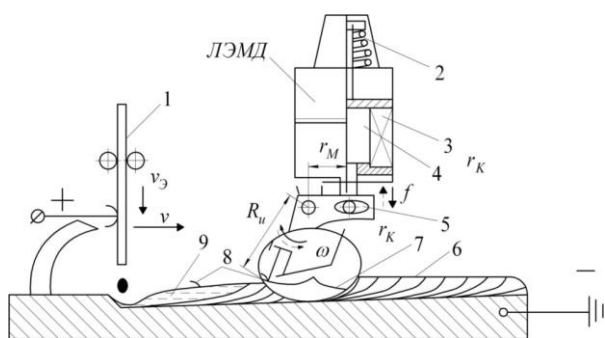


Рисунок 32–Схема обработки по принципу циклического терморезания с приводом от ЛЭМД

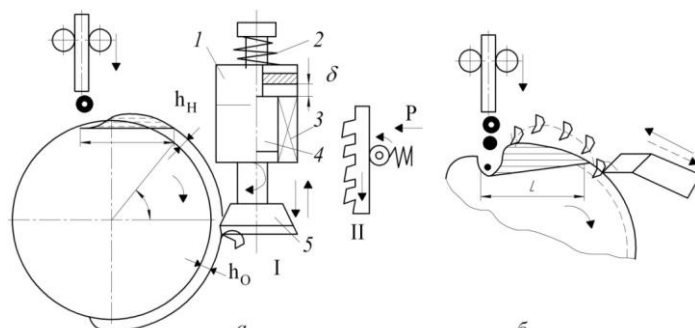


Рисунок 33– Схемы терморезания: а - резцом (I), протяжкой (II); 1 - статор; 2 - пружина; 3 - обмотка; 4 - якорь; 5 - резец; б - безотходное строгание

Ввод сравнительно небольшой механической энергии с помощью импульсного ЛЭМД в технологические процессы с высококонцентрированными потоками энергии позволяет упростить эти процессы за счет возможности совмещения технологических операций. Например, при восстановлении колесных пар железнодорожных вагонов за счет возможности совмещения операций наплавки и терморезания (Рисунок 33).

Выполнено сравнение (Рисунок 34) конструктивных схем однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной (ВП) (Рисунок 28) и с пружинным накопителем (ПН) (Рисунок 27). Выявлено, что первая схема превосходит вторую по частоте ходов (б), однако уступает ей по энергии удара (а) и ударной мощности (в).

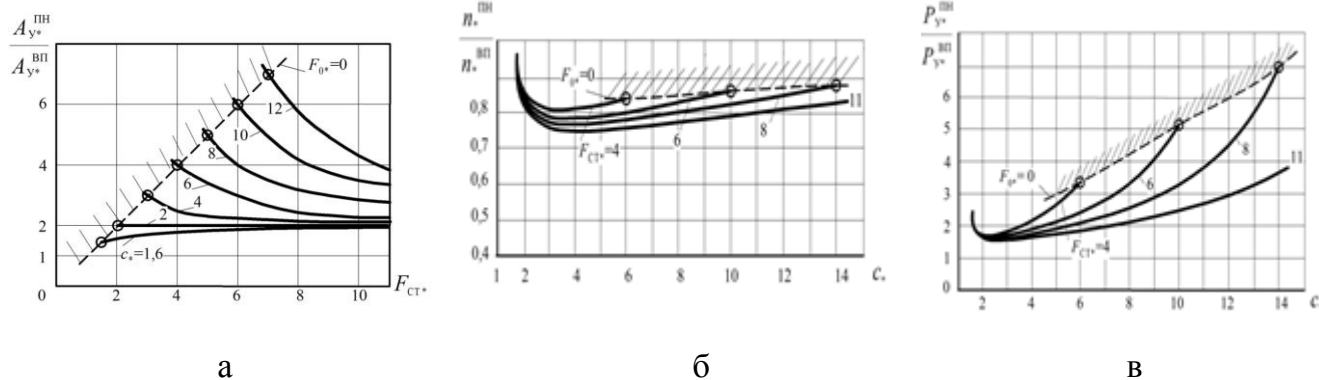


Рисунок 34– Сравнение конструктивных схем однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной (ВП) и с пружинным накопителем (ПН) по энергии удара(а), по частоте ходов (б) и по ударной мощности (в)

Многообразие технологических процессов вызывает необходимость разработки не только различных конструкций ЛЭМД, но и создания устройств питания и управления (УПУ) ими, которые могли бы обеспечить регулирование выходных параметров ЛЭМД (табл. 8), которые обеспечивает одиночные ходы и стабилизацию полезной работы за цикл за счет синхронизации и коррекции длительности импульса, питающего обмотки возбуждения и удержания.

Таблица 8 – Основные показатели разработанных трехфазных УПУ

Тип УПУ	Режим работы при- вода	Полезная работа, Дж	Плавность регулируе- ния за цикл	Диапазон частоты хо- дов, мин ⁻¹	Стабилизация полезной ра- боты за цикл
УПУ-3С	одиночные ходы	0-1000	нет	нет	нет
УПУ-3СО	одиночные ходы	0-1000	нет	нет	нет
УПУ-3	одиночные ходы	0-1000	есть	нет	есть
УПУ-3СС	одиночные и не- прерывные ходы	0-1000	нет	0-300	нет

Экспериментальные исследования УПУ подтвердили возможность стабилизации энергии удара с отклонением 2...5% при изменении напряжения сети U_c в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения. Тогда как аналогичное устройство УПУ без стабилизации вызывает отклонение энергии удара в 19...21%, что не приемлемо для ряда технологических операций (завальцовка корпусов химических источников тока, клеймение, вырубка слюды и т.п.).

Для промышленной сети импульсный ЛЭМД является ударной нагрузкой с малым временем действия от 0,01 с до 0,2 с при потреблении тока до сотен ампер. Это вызывает резкие колебания напряжения сети. При разложении в ряд Фурье тока фазы источника, питающего ЛЭМД по трехфазной мостовой схеме выпрямления через силовые трансформаторы типа ТМ, удалось связать сопротивления двигателя со стороны сети переменного тока с провалами напряжения и получить границы и области допустимого изменения его параметров при отклонении напряжения $\delta U = 5\%$ для трансформаторов типа ТМ (Рисунок 35).

Перспективными конструктивными схемами импульсных ЛЭМД являются двигатели с однозачорной клиновидной МС, двухобмоточные с двухзачорной МС, однообмоточные ЛЭМД с двухзачорной МС со сквозным каналом и ЛЭМД с трёхзачорной МС.

В заключении обобщаются выводы, полученные по результатам работы. Исследования, проведенные и обобщенные в диссертации, были направлены на развитие и решение крупной научно-технической проблемы создания импульсных линейных электромагнитных двигателей для технологий с высококонцентрированными потоками энергии в машиностроении, строительстве, литейном производстве, швейной отрасли, в радиоэлектронной промышленности, что позволяет повысить производительности труда, снизить потребление энергии, высвободить производственные площади.

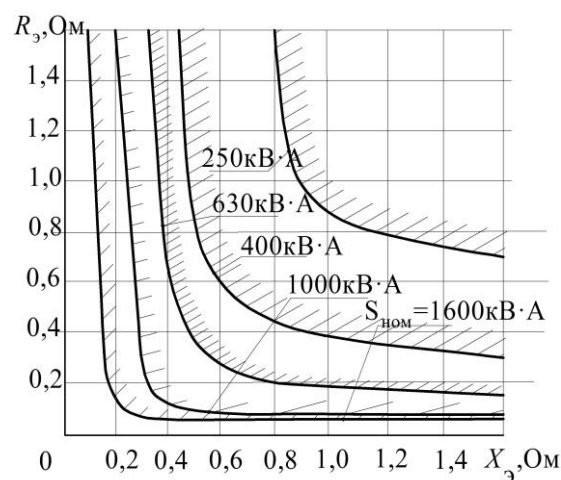


Рисунок 35 – Границы и области допустимого изменения параметров ЛЭМД для трансформаторов типа ТМ

Основные научные и практические результаты исследований. заключаются в следующем.

1. Установлены требования к значениям механической энергии и частот воздействия для широкого спектра технологических процессов, реализуемых ЛЭМД: механическая энергия $1 \dots 5 \cdot 10^4$ Дж, частоты $0,1 \dots 100$ Гц.

2. Впервые установлены области допустимых сочетаний геометрических параметров элементов магнитных систем интегрированного ЛЭМД на основе общего магнитопровода.

3. Определены оптимальные геометрические параметры и соотношения основных размеров МС ЛЭМД по критериям «удельная интегральная механическая работа» и «удельное тяговое усилие».

4. Для заданной интегральной работы и превышения температуры определены оптимальные значения параметров: $x = r_2/r_1 = 1,5 \dots 1,6$; $y = l_k/r_1 = 2 \dots 4$, где r_1 – радиус втяжной части якоря; r_2, l_k – внешний радиус и длина обмотки для ЛЭМД с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем; для ЛЭМД с укороченной длиной магнитной системы $x = 1,4 \dots 1,5$; $y = 1,5$; с поперечным магнитным полем $x = 1,4 \dots 1,5$; $y = 1,1 \dots 1,2$.

5. Установлено, что значения основных выходных параметров ЛЭМД (энергии и усилия) определяются уровнем аккумулируемой на этапе трогания магнитной энергии и зависят от обобщенного конструктивно-режимного параметра Θ_n .

6. Определены факторы, влияющие на обобщенный конструктивно-режимный параметр Θ_n : количество рабочих зазоров, величина рабочего хода, ток трогания, что позволяет обосновать конструктивную схему ЛЭМД.

7. Обоснованы критерии разграничения электромеханических режимов по интенсивности энергетической эффективности импульсных ЛЭМД. В качестве критериев определены коэффициенты восстановления и ослабления магнитного поля рабочих зазоров двигателя, позволяющие получить максимальную механическую работу.

8. Получены основные электромеханические характеристики ЛЭМД для эффективных энергетических режимов при различных состояниях магнитных систем, что позволяет расширить область технологического применения ЛЭМД.

9. Разработаны методы проектного расчета ЛЭМД для широкого диапазона сил, энергий и частот воздействия на технологический объект.

10. Разработан на уровне изобретений способ передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры, что позволило повысить эффективность электромеханического преобразования энергии с требуемым характером изменения параметров.

11. Разработаны на уровне изобретений схемные и конструктивные решения технологического оборудования с однообмоточными ЛЭМД, обладающие повышенными динамическими, силовыми и энергетическими показателями.

12. Обоснованы области допустимой работы ЛЭМД, исходя из заданного уровня колебаний напряжения, вызванного работой линейного электромагнитного привода, при питании его от электрических сетей промышленных предприятий и силовых трансформаторов.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования – поиск рациональных конструкций магнитных систем для однозазорных, двухзазорных и трехзазорных импульсных ЛЭМД с одной обмоткой возбуждения с заданными тяговыми характеристиками; выполнение аналогичных исследований для двухобмоточных ЛЭМД и сравнение их с однообмоточными конструкциями по динамическим показателям.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Мошкин, В.И. Тиристорный преобразователь для управления линейным импульсным электрическим двигателем с электромагнитным узлом статического нагружения якоря / В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин // Вестник Саратовского государственного аграрного ун-та. 2005. №4. – С.51-54 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.).

2. Мошкин, В.И. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического ун-та, №1(10), вып.1. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2006. – С. 39-44 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

3. Мошкин, В.И. Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнитных машинах / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического ун-та, №3(47), вып.2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2010. – С. 65-71 (0,44 п. л. / 0,2 п. л.).

4. Мошкин, В.И. Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в линейном электромагнитном двигателе / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического ун-та, №3(47), вып.2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2010. – С. 71-76 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

5. Мошкин, В.И. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Известия Волгоградского государственного технического ун-та, №8(81). Вып. 3. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». – Волгоград: Изд-во ВолГТУ. 2011. – С. 108-111 (0,25 п. л. / 0,15 п. л.).

6. Мошкин, В.И. Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического ун-та, №2(66), вып.2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2012. – С. 124-129 (0,38 п. л. / 0,2 п. л.).

7. Мошкин, В.И. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического ун-та, №2(66), вып.2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2012. – С. 129-135 (0,44 п. л. / 0,25 п. л.).

8. Мошкин, В.И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учётом мощности потерь в его обмотке / В.И. Мошкин // Известия Томского политехнического ун-та, № 4. Том 321. – Томск: Изд-во ТПУ. 2012. – С. 93-96 (0,25 п. л.).

9. Мошкин, В.И. К расчёту усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин // Электротехника. 2013. № 8. – С. 60-63 (0,25 п. л.).

10. Мошкин, В.И. Математическое моделирование импульсных линейных электромагнитных двигателей. / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2014. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2014. – С. 348-352 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.). (**Scopus**)

11. Мошкин, В.И. Оценка эффективности способов концентрации магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2014. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2014. – С. 344-348 (0,31 п. л. / 0,2 п. л.). (**Scopus**)

12. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с укороченной магнитной системой / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Научное обозрение. 2015. №4. – С. 22-28 (0,44 п. л. / 0,2 п. л.).

13. Мошкин, В.И. Влияние импульсных линейных электромагнитных двигателей на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Электротехника. 2015. №2.– С.16-21 (0,38 п.л. / 0,2 п.л.).

14. Мошкин, В.И. Определение основных геометрических параметров импульсного линейного электромагнитного двигателя по значению максимального тягового усилия / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Научное обозрение. 2015. №3. – С. 18-23 (0,38 п. л. / 0,2 п. л.).

15. Moshkin, V.I. The effect of pulse linear electromagnetic motors on voltage fluctuations in electric power networks of an industrial enterprise / V.I. Moshkin, G.G. Ugarov // [Russian Electrical Engineering](#) Volume 86, Issue 2, 1 February 2015, Pages 61-65 (0,31 п. л. / 0,2 п. л.). (**Scopus**)

16. Мошкин, В.И. Предельная магнитная энергия электромеханического преобразователя электромагнитного типа / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2016. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ. 2016. – С. 424-428 (0,31 п. л. / 0,2 п. л.). (**Scopus**)

17. Мошкин, В.И. Электромеханические характеристики импульсных линейных электромагнитных двигателей продольного магнитного поля в функции перемещения / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2016. Материалы Международной научно-технической конференции. Том. 2. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – С. 408-415 (0,5 п. л. / 0,3 п. л.). (**Scopus**)

18. Moshkin, V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the de-saturated magnetic system / V.I. Moshkin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications, 2017. – Pages 1-4 (0,25 п. л.). (**Scopus**)

19. Мошкин, В.И. Условия отрыва якоря интегрированного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин. // Электротехника. 2017. № 1. – С.16-21 (0,38 п. л.).

Патенты и программы:

20. А.с. № 1810963А1 Н02К 33/02. Электромагнитный двигатель /Э.Ф. Маер, А.Г. Баталов, В.И. Мошкин, и И.П. Попов. 23.04.93. БИ №15.

21. Патент RU №2018652, E21C 3/16. Электрический молот. / Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин, И.П. Попов (РФ). 4712733/03; заявл. 03.07.89; опубл. 30.08.1994.

22. Патент RU № 2025277, C1 B 30 B 1/42, B21J 7/30. Электромагнитный пресс /Э.Ф. Маер, В.И. Мошкин, В.Ф. Мошкина, И.П. Попов. 30.12.94. БИ №24.

23. Патент RU №2026792, МПК В30В1/42 /Э.Ф. Маер, А.Г. Баталов, В.И. Мошкин, В.Ф. Мошкина. Электромагнитный пресс. Опубл. 20.01.1995.

24. RU № 46893 U1 Н02Р 7/62 Устройство для управления однообмоточным электромагнитным двигателем ударного действия /А.В. Волгин, К.М. Усанов, В.И. Мошкин. 27.07.2005 БИ № 21.

25. RU № 59342 U1 Н 02 К 33/02. Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря /В.И. Мошкин, К.М. Усанов и А.В. Волгин. 10.12.2006. БИ № 34.

26. RU № 59343 U1 Н02К 41/03. Линейный шаговый электромагнитный двигатель /В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин и А.В. Львицын. 10.12.2006. БИ № 34.

27. RU № 2478252 С2 Н02К 33/16, Н02К 41/02, Н02К 1/06. Линейная электрическая машина/ В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 27.03.2013.

28. RU №2479431 С2 В30В 1/42, В21J 7/30. Электрический пресс / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 20.04.2013.
29. RU № 2479705 С2 E21В 1/22, E02D 7/02. Электромагнитный молот/ В.И. Мошкин, И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов и С.Ф. Сарапулов. 20.04.2013.
30. Патент RU №2528942, С2 В30 В 1/42 Электромеханический пресс// И.П. Попов, В.И. Мошкин, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева. 20.09.2014. Бюл. № 26.
31. Патент RU №2567872 С2 H02K 41/035. Электрическая машина возвратно поступательного движения / В.И. Мошкин, И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева. 10.11.2015. Бюл. № 31.
32. Патент RU № 2601727 С1. Электромагнитный пресс. МПК В30В 1/42, В 21J 7/30, H02 К 33/02 /В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов. Оpubл. 10.11.2016. Бюл. №31.
33. Патент RU № 2604356 С1. Импульсный электромагнитный привод. Н 02 К 33/02, Н 01 F 7/18 /В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов. Оpubл. 10.12.2016. Бюл. №34.

Монографии:

34. Усанов, К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: Монография / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. –284 с (17,75 п. л. / 5,95 п. л.).
35. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: Монография / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с (13,75 п. л. / 4,6 п. л.). *(Монография была удостоена премии Губернатора Курганской области в 2011 году)*
36. Егоров, А.А. Импульсный линейный электромагнитный привод устройств маркирования и клеймения: Монография / А.А. Егоров, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. –136 с (8,5 п. л. / 2,85 п. л.).
37. 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 гос. ун-та, 2015. – 202 с (12,62 п. л. / 3,15 п. л.).

Другие публикации:

38. Мошкин, В.И. Регулируемые линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий и привода / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Тезисы докл. VII научно-технической конференции «Повышение надежности, экономичности и конкурентоспособности асинхронных электродвигателей и электроприводов». – Кемерово, 1992. – С. 8-9 (0,12 п. л. / 0,05 п. л.).
39. Угаров, Г.Г. Режимы форсированного накопления магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, В.И. Мошкин // Электроприводы переменного тока: доклады 10-й научно-технической конференции ЭППТ-95, 14-17 марта 1995 г. – Екатеринбург, 1995, – С 154-155 (0,12 п. л. / 0,05 п. л.).
40. Дмитриенко, А. В. Расчёт статических тяговых характеристик цилиндрического ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем / А. В. Дмитриенко, В. И. Мошкин, Г. Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Вып. 1. №2(02) – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – С. 236-238 (0,3 п. л. / 0,1 п. л.).
41. Мошкин, В.И. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах / В.И. Мошкин, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 1. – Курган: Изд-во КГУ, №2(02), 2005. – С. 239–240 (0,15 п. л. / 0,05 п. л.).

42. Егоров, А.А. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в силовых электромагнитных импульсных системах / А.А. Егоров, Д.А. Вырыханов, В.И. Мошкин // Интеллектуальный потенциал высшей школы – железнодорожному транспорту: Сб. науч. статей: В 2 т. –Саратов: Научная книга. 2006.– Т. 1. – С. 39-42 (0,25 п. л. / 0,05 п. л.).

43. Мошкин, В.И. Импульсные технологии в сельском хозяйстве. / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства. Сборник научн. докл. XV Международной научно-практической конференции.– Тамбов: Изд-во Першина Р.В. , 2009.– С. 572-576 (0,31 п. л. / 0,15 п. л.).

44. Мошкин, В.И. Накопители энергии в силовых электромагнитных импульсных системах / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.А. Вырыханов // Инновационные технологии в обучении и производстве. Сб. науч. докл. VI Всероссийской научно-практической конференции. Том 2. – Камышин: Изд-во ВолгГТУ, 2009. – С. 79-82 (0,25 п. л. / 0,05 п. л.).

45. Моисеев, А.П. Обоснование выбора двигателей привода тросошайбовых (штанго-дисковых) транспортеров / А.П. Моисеев, В.И. Мошкин, К.М. Усанов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства. Сборник научн. докл. XV Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2009. – С. 555-558 (0,25 п. л. / 0,05 п. л.).

46. Мошкин, В.И. Специфические эффекты силовых механических импульсных воздействий на технологически объекты / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Проблемы электроэнергетики. Межвуз. научн. сборник. – Саратов, 2009. – С. 71-75 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.).

47. Мошкин, В.И. Оценка параметров устройства форсированного накопления магнитной энергии линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, г. Камышин, 15-16 декабря 2009 г. Том 2. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2010. – С. 75-78 (0,25 п. л. / 0,15 п. л.).

48. Мошкин, В.И. Анализ процесса намагничивания линейного электромагнитного двигателя с интегрированным устройством форсированного аккумулирования магнитной энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VI Всероссийской научно-практической конф., том 2, Волгоград, 2010. – С.71-75 (0,31 п. л. / 0,15 п. л.).

49. Мошкин, В.И. Аккумулирование магнитной энергии в интегрированных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики. Межвуз. научн. сборник. - Саратов, 2010. С. 62-68 (0,44 п. л. / 0,25 п. л.).

50. Мошкин, В.И. Оценка влияния конструктивных параметров ферромагнитного шунта на величину усилия удержания якоря ЛЭМД / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета.– Серия «Технические науки».– Вып. 5. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – С. 63-68 (0,38 п. л.).

51. Мошкин, В.И. Специальные режимы линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, А.П. Моисеев, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2010. – С. 234-238 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.).

52. Мошкин, В.И. Определение продолжительности включения линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) в приводе технологического оборудования / В.И. Мош-

кин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. научн. сборник. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. – С. 92-94 (0,19 п. л. / 0,05 п. л.).

53. Мошкин, В.И. Биполярный источник питания линейных электромагнитных двигателей на электрохимических конденсаторах / В.И. Мошкин, И.М. Хусаинов, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции г. Камышин 22–23 декабря 2010 г. Том 1. – С 126-130 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.).

54. Мошкин, В.И. Устройство питания и управления нового поколения для линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, И.М. Хусаинов, Г.Г. Угаров // Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции г. Камышин 22–23 декабря 2010 г. Том 1. – С.130-133 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.).

55. Мошкин, В.И. Взаимосвязь основных геометрических параметров импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин // Вестник Международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Том 16. № 3. – Санкт-Петербург – Курган: 2011. – С. 42-45 (0,25 п. л.).

56. Мошкин, В.И. Основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 6. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2011. – С. 105-109 (0,31 п. л.).

57. Мошкин, В.И. Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей при рекуперации магнитной энергии рабочих зазоров / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, С.Ю. Помялов // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы I Международной научно-технической конференции. Часть 5. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. – С. 87-92 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

58. Мошкин, В.И. Особенности построения устройств питания и управления импульсным электромагнитным двигателем от промышленной сети / В.И. Мошкин, С.Ю. Помялов, А.А. Трофимов // Вестник Курганского государственного университета. № 1(20) – Серия «Технические науки». Вып. 6. – Курган: Изд-во КГУ, 2011. – С. 109-113 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.).

59. Мошкин, В.И. Энергетические характеристики элементарных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа при насыщенной магнитной цепи / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 7. – Курган: Изд-во КГУ, №2(24), 2012. – С. 72-77 (0,4 п. л.).

60. Мошкин, В.И. Способы и устройства повышения концентрации магнитной энергии в линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Электроприводы переменного тока. Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. 12-16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2012. – С. 19-22 (0,25 п. л. / 0,15 п. л.).

61. Мошкин, В.И. Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей при рекуперации в питающую сеть магнитной энергии рабочих зазоров / В.И. Мошкин // Стратегия качества в промышленности и образовании 8-15 июня 2012 г. Материалы VIII Международной конференции. Том 2. Варна, Болгария. – С. 134-138 (0,31 п. л.).

62. Мошкин, В.И. Энергетические характеристики процесса заряда ёмкостного накопителя энергии / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 7. – Курган: Изд-во КГУ, №2(24), 2012. – С. 82-85 (0,25 п. л.).

63. Мошкин, В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Курганского государственного университета. № 2(29) – Серия «Технические науки». Вып.8. – Курган: Изд-во КГУ, 2013. – С.88-90 (0,19 п. л. / 0,1 п. л.).

64. Мошкин, В.И. Продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя в приводе технологического оборудования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, С.Ю. Помялов // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы LI Международной научно-технической конференции. Часть 5. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2013. – С. 57-60 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.).

65. Мошкин, В.И. Линейный электромагнитный привод для энергосберегающих электротехнологий (проблемы и реализация) / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014. Материалы III Международной конференции. Сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2014. – С. 201-207 (0,44 п. л. / 0,25 п. л.).

66. Мошкин, В.И. Основные размеры и их соотношения для магнитной системы импульсного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2014. –№1(2). – С.71-78 (0,5 п. л. / 0,3 п. л.).

67. Мошкин, В.И. Моделирование тяговых характеристик линейного электромагнитного двигателя с различным материалом магнитопровода / В.И. Мошкин, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Вестник Курганского государственного университета. № 2(33) – Серия «Технические науки». Вып.9. – Курган: Изд-во КГУ, 2014. – С.85-87 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

68. Ugarov, G.G. The Effect of Design Parameters of an Integrated Linear Electromagnetic Motor, At the Process of Pulling Away Anchor, From Its Breakaway Stage./ G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, A.K. Massad / International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER). – 2014. Sept. – Vol. 4. | Iss.9. –Pages 42-49 (0,5 п. л. / 0,2 п. л.).

69. Ugarov, G.G. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor ./ G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, A.K. Massad / The International Journal of Engineering And Science (IJES). – 2014. – V. 3. Iss. 4. – P. 01-06 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

70. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные приводы в энергосберегающих электротехнологиях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2014. –№1(2). – С.86-90 (0,31 п. л. / 0,1 п. л.).

71. Мошкин, В.И. К сравнению конструктивных схем импульсных линейных электромагнитных двигателей/ В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2014. –№4(5). – С. 34-40 (0,44 п. л. / 0,3 п. л.).

72. Мошкин, В.И. Влияние импульсных электромагнитных двигателей на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия / В.И. Мошкин, С.Ю. Помялов, Г.Г. Угаров // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы LIII Международной научно-технической конференции. Часть III. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2014. – С. 269-275 (0,44 п. л. / 0,15 п. л.).

73. Мошкин, В.И. Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики линейного электромагнитного двигателя с поперечным магнитным полем / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015. –№1(6). – С.77-83 (0,44 п. л. / 0,25 п. л.).

74. Мошкин, В.И. Энергетические и динамические показатели однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с пружинным накопителем / В.И. Мошкин. // Известия ТПУ, № 5. Том 326. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 54-61 (0,5 п. л.).

75. Мошкин, В.И. Концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах импульсного линейного электромагнитного двигателя на этапе ее электромагнитного преобразования / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015. – №4(9). – С.20-26 (0,44 п. л. / 0,3 п. л.).

76. Мошкин, В.И. О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный электромеханический преобразователь / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2015, №3(8). – С.77-83 (0,44 п. л. / 0,3 п. л.).

77. Мошкин, В.И. Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016) (Пермь, 3-7 октября 2016 г.).– Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 71-76 (0,45 п. л. / 0,3 п. л.).

78. Мошкин, В.И. Режимы аккумулирования магнитной энергии в линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2016. – №2(11). – С. 25-30 (0,38 п. л. / 0,2 п. л.).

79. Мошкин, В.И. О возможности увеличения энергии рабочего хода импульсного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, – 2016. – №2(11). – С. 19-24 (0,38 п. л. / 0,15 п. л.).

80. Угаров, Г.Г. Электромагнитогидравлические машины ударного и вибрационного действия / Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // Вопросы электротехнологии. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – № 1 (10). С. 63-66 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.).

81. Мошкин, В.И. Влияние степени восстановления магнитной энергии импульсного линейного электромагнитного двигателя на его механическую работу / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. // Труды 6-й Международной научно-практической конференции ЭКСИЭ - 06 «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии», г. Екатеринбург, Россия, 19 апреля 2017 г.– Екатеринбург, УМЦ УПИ, 2017. – С 144-147 (0,25 п. л. / 0,15 п. л.).

Подписано в печать __. __. 2017 г. Формат 60x84 1/16
Печать цифровая Усл. печ. л. 2,12
Заказ Тираж 100

Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 2,12
Бесплатно

Редакционно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63 / 4.
Курганский государственный университет.