

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

На правах рукописи



КАРГИН Виталий Александрович

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

**Специальность 05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве**

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Саратов - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕН- СТVOВANIA И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ АПК.....	15
1.1 Сравнительные возможности использования ЛЭМД-привода в технологиях АПК.....	15
1.1.1 ЛЭМД-привод для ударных процессов и технологий	15
1.1.2 ЛЭМД-привод для безударных процессов и технологий....	30
1.2 Обобщенная структурная схема ЛЭМД-привода для технологий АПК.....	54
1.3 Выводы по первой главе.....	58
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ И СНИЖЕНИЯ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛЭМД-ПРИВОДОВ.....	59
2.1 Магнитные системы линейных электромагнитных двигателей...	59
2.2 Моделирование процессов энергопреобразования в магнитных системах ЛЭМД со сквозным осевым каналом.....	62
2.3 Оптимальные геометрические соотношения в магнитных систе- мах ЛЭМД.....	78
2.4 Процессы нагревания и интенсификация теплообмена в ЛЭМД ударного и безударного привода.....	82
2.4.1 Процессы нагрева и охлаждения ЛЭМД.....	86
2.4.1.1 ЛЭМД кратковременного режима.....	86
2.4.1.2 ЛЭМД продолжительного режима.....	90
2.4.1.3 Определение стационарного температурного поля ЛЭМД.....	93
2.4.1.4 Влияние контактирующих поверхностей обмотки и статора на тепловой поток в ЛЭМД.....	97
2.4.2 Интенсификация охлаждения ЛЭМД.....	102
2.4.2.1 Способы интенсификации охлаждения ЛЭМД.....	102
2.4.2.2 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с развитой теплоотдающей поверхностью.....	105
2.4.2.3 Влияние оребрения корпуса ЛЭМД на эффектив- ность системы охлаждения.....	109
2.4.2.4 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с самовентиляци- ей.....	111
2.4.2.5 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с принуди- тельной вентиляцией.....	126
2.4.2.6 Оценка эффективности охлаждения ЛЭМД в приводе машин.....	130
2.5 Конкурентные конструктивные схемы и показатели ЛЭМД для приводов машин АПК.....	135

2.6 Выводы по второй главе.....	142
3. КОМПОНОВОЧНЫЕ СХЕМЫ РАБОЧИХ МАШИН С ЛЭМД-ПРИВОДАМИ.....	143
3.1 Машины с ЛЭМД-приводом ударного действия.....	143
3.1.1 Машина для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт.....	143
3.1.2 Машина для сводообрушения.....	149
3.2 Машины с ЛЭМД-приводом неударного действия.....	151
3.2.1 Штанговые, тросовые транспортеры.....	151
3.2.2 Прессы для отжима сока.....	160
3.2.3 Устройство клипсования упаковки сельхозпродукции.....	168
3.2.4 Устройство для шприцевания колбасного фарша.....	169
3.3 Выводы по третьей главе.....	170
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛЭМД-ПРИВОДОВ.....	171
4.1 Принципы построения электрических преобразователей ЛЭМД-приводов.....	171
4.1.1 Преобразователи, подключаемые к автономному источнику питания.....	171
4.1.2 Электрические преобразователи с емкостными накопителями энергии.....	182
4.2 Электрические преобразователи с автоматическим управлением выходных параметров машин с ЛЭМД.....	188
4.2.1 Адаптивная система автоматического регулирования выходной механической энергии машины с ЛЭМД.....	188
4.2.2 Автоматическое управление выходной механической энергией в функции времени.....	208
4.2.3 Автоматическое управление ЛЭМД в функции противодействующего усилия.....	209
4.2.4 Автоматическое управление выходным усилием ЛЭМД в функции времени.....	216
4.3 Выводы по четвертой главе.....	225
5. ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ.....	226
5.1 Физические модели и особенности рабочих процессов ЛЭМД....	226
5.1.1 Методика и технические средства эксперимента.....	226
5.1.2 Оценка рабочих процессов ЛЭМД, питаемого от аккумуляторного источника.....	236
5.1.3 Оценка рабочих процессов ЛЭМД, питаемого от емкостного накопителя энергии.....	240
5.2 Математические модели и характеристики ЛЭМД-привода на основе теории планирования экспериментов.....	244
5.2.1 Влияние параметров ударного ЛЭМД-привода на эффективность энергопреобразования.....	244

5.2.2 Влияние параметров безударного привода на эффективность энергопреобразования ЛЭМД.....	259
5.3 Выводы по пятой главе.....	268
6. РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ.....	269
6.1 Производственные испытания ЛЭМД-приводов.....	269
6.1.1 Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции.....	269
6.1.2 Производственные испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт.....	271
6.1.3 Производственные испытания ЛЭМД-привода для сводообрушения.....	272
6.2 Техничко-экономическая оценка результатов внедрения ЛЭМД-приводов.....	274
6.2.1 Техничко-экономическая оценка внедрения ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт.....	274
6.2.2 Техничко-экономическая оценка внедрения ЛЭМД-привода кормораздаточного транспортера.....	279
6.3 Выводы по шестой главе.....	281
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	282
СПОСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	286
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	317

ВВЕДЕНИЕ

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

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

Предпочтительность применения ЛЭМД-приводов в обоснованных случаях объясняется возможностью упрощения кинематических схем и конструкций машин, уменьшения многоступенчатости энергопреобразования, повышения удельных характеристик изделий, усовершенствования ряда технологий, улучшения экологичности и достижения ресурсосбережения в АПК. Прогнозные оценки, в частности показывают, что использование ЛЭМД-приводов взамен традиционных позволяет сократить энергозатраты на реализацию некоторых операций от двух и бо-

лее раз и сэкономить за год, в среднем, не менее 1000 кВт·ч электроэнергии на каждую систему.

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

Поскольку линейный электромагнитный двигатель обоснованно выдвигается главной операциональной «единицей» при анализе таких систем, в настоящее время значительная часть исследований направлена на совершенствование и повышение эффективности именно ЛЭМД. При этом, изучению других важных компонентов системы, например, устройств передачи механической энергии от двигателя исполнительному органу, системы питания и управления, определяющих ее практическую пригодность и оказывающих непосредственное влияние на показатели, при исследовании ЛЭМД-приводов уделяется значительно меньше внимания.

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

Преодолеть подобную ограниченность, определить недостаточность прежних условий для постановки и решения новых практических задач, обозначить отличные от существующих структурные и типологические характеристики элементов ЛЭМД-приводов позволяет системный подход. Таким образом, комплексное, с учетом принципов этого подхода, решение проблемы совершенствования и создания приводов с электромагнитными двигателями, повышающими эффектив-

ность и экологичность целого ряда операций и процессов в технологиях АПК, представляется актуальным.

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

- Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013 – 2020 годы (утв. 20 декабря 2012 г., № 2433-р);
- Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (утв. 21 мая 2013 г., № 426);
- Государственная программа Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области на 2014-2020 годы», подпрограмма 4 «Техническая и технологическая модернизация, научно-инновационное развитие на 2014-2020 годы» (утв. 2 октября 2013 г., № 520-П);
- Приоритетное научное направление ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (регистрационный номер 01201151795).

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

Приоритетные направления в исследованиях большинства ученых связаны с разработкой и повышением эффективности собственно линейных электриче-

ских, в том числе, электромагнитных, двигателей, что затрудняет их интегрирование в существующие технологии АПК. Рациональная структура и организация взаимодействия элементов электропривода ЛЭМД, оптимальное управление системой и т.д. в настоящее время требуют пристального внимания, совершенствования и представляют большой научно-практический интерес.

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

Однако степень изученности, уровень технического и технологического совершенства подсистем – взаимодействующих электромеханических, механических преобразователей электроэнергии, управляющих устройств, – в известных ЛЭМД-приводах представляются неоднозначными. Здесь существенное противоречие, определяющее **научную проблему**, состоит в том, что, с одной стороны, предложенные к настоящему времени двухзазорные броневого цилиндрические ЛЭМД возвратно-поступательного движения реализуют лишь ограниченное однонаправленное перемещение якоря или инструмента и имеют значительный перегрев обмотки, предопределяющий низкую, неконкурентную нормированную продолжительность включения ПВ, с другой – ЛЭМД-приводы операций и процессов АПК должны обеспечивать не только одно- или двунаправленные необходимые перемещения исполнительного органа, но и повышенное нормированное значение ПВ, соответствующее технологии.

Задачи исследований:

- выявить особенности и обосновать конкурентность применения ЛЭМД-приводов в технологиях АПК;
- сопоставить показатели магнитных систем и теоретически обосновать способ улучшения функциональности броневого цилиндрических ЛЭМД;
- разработать математические модели стационарных и нестационарных тепловых процессов, оценить влияние значимых факторов на нагрев ЛЭМД; сформули-

ровать рекомендации по интенсификации охлаждения с целью увеличения продолжительности включения двигателя;

- усовершенствовать существующие и предложить новые устройства вывода и передачи механической энергии от двигателя к исполнительному органу, интегрированные в конструкцию ЛЭМД-привода;
- развить принципы построения и разработать конструктивные схемы ударных и безударных ЛЭМД-приводов, обеспечивающих новые функциональные возможности, лучшие характеристики и энергетические показатели системы;
- проанализировать принципы построения и разработать схемы электрических преобразователей с адаптацией выходных параметров ЛЭМД-приводов при переменной нагрузке;
- провести экспериментальные исследования рабочих процессов в ЛЭМД-приводах, оценить показатели и выходные характеристики с учетом оказывающих существенное влияние на режимы работы ЛЭМД-приводов факторов;
- провести производственные испытания и технико-экономическую оценку результатов внедрения созданных образцов машин с ЛЭМД-приводом.

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

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

Научную новизну работы представляют:

- теоретические имитационные модели цилиндрического двухзазорного электро-механического преобразователя электромагнитного типа с магнитной системой со сквозным осевым каналом;
- теоретические модели процессов нагревания-охлаждения цилиндрического электро-механического преобразователя электромагнитного типа и способы интенсификации теплообмена в ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами;

- энергопреобразовательные режимы ударных, безударных ЛЭМД-приводов, определяемые совокупностью функциональных компонентов и способами электропитания электромеханического преобразователя привода;
- результаты экспериментальных исследований полноразмерных установок и физических моделей приводов ударного и неударного действия с линейными электромагнитными двигателями.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

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

Методология и методы исследований. При выполнении работы учтены основополагающие принципы системного подхода. Теоретические исследования проводились с использованием законов электромеханики, теоретических основ электротехники, основных положений теории электрических машин и автоматизированного электропривода, аппарата математического анализа и численных методов решения задач.

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

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

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

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

Личный вклад соискателя состоит в разработке плана исследований; проведении анализа литературных источников по обоснованию актуальности изучаемой проблемы; постановке и решении задач исследования; выполнении теоретических исследований; проведении лабораторных испытаний; разработке электри-

ческих преобразователей, обеспечивающих автоматическую подстройку выходных характеристик ЛЭМД-привода в функции изменения нагрузки; совершенствовании конструкции ударных и безударных машин с ЛЭМД; проведении лабораторных испытаний и на производстве; апробации результатов; подготовке и публикации научных статей по тематике работы.

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

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

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

- X Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2 – 3 мая 2004 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, 21 – 24 сентября 2004 г.);
- III Всероссийской конференции «Инновационные технологии в обучении и производстве» (г. Камышин, 20 – 22 апреля 2005 г.);
- конференции, посвященной 119-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (Саратов, 23 – 25 ноября 2006 г.);

- Международных научно-практических конференциях «Вавиловские чтения» (г. Саратов, 2007, 2008, 2009);
- III и IV Международных научно-практических конференциях «Технология и продукты здорового питания» (г. Саратов, 2009, 2010 гг.);
- XV Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции» (г. Тамбов, 2009 г.);
- Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного производства» (г. Курск, 2010 г.);
- I – IX Международных научно-практических конференций «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2010-2018 гг.);
- XLIX и L Международных научно-практических конференций «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, 2010, 2011 гг.);
- Международной научно-практической конференции «Инновации, наука и образование XXI века» (г. Саратов, 2010 г.);
- Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г. (г. Саратов, 2011 г.);
- Шестом Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (г. Саратов, 2011 г.);
- X Международной научно-практической конференции «Образовательная среда сегодня и завтра» (г. Москва, 2015 г.);
- VII Международной научно-практической конференции «Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (г. Саратов, 2016 г.);
- VI Международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (г. Саратов, 2017 г.);
- на Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (Москва, 2018 г.);

– ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова в 2003 – 2019 гг.

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

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» и обобщает результаты научных исследований и практических разработок автора в период с 2003 по 2019 гг. и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 264 наименований, из которых 16 на иностранном языке и 9 приложений. Материал работы изложен на 375 страницах машинописного текста, включая 172 рисунка и 39 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ АПК

1.1 Сравнительные возможности использования ЛЭМД-привода в технологиях АПК

1.1.1 ЛЭМД-привод для ударных процессов и технологий Возможности использования ЛЭМД-привода в сводообрушителях.

Ряд процессов и операций сельхозпроизводства связаны с хранением сыпучих материалов. Зачастую для этих целей используют специальные бункерные устройства, для которых характерны перебои при выгрузке продукта из-за образующихся вблизи выпускных отверстий устойчивых сводов [26,27]. Как показано в [26,27,54] до 30 % общих затрат на обслуживание бункерных устройств приходится на затраты по устранению сводов.

В настоящее время задача бесперебойной выгрузки сыпучих материалов решается совокупностью мер: совершенствованием собственно конструкции бункерных устройств и выгрузных отверстий путем выбора их оптимальных геометрических соотношений [26,27,65], и применением различных сводообрушающих устройств [37,54,56,93,163-165,193].

Эти приспособления классифицируются (рис.1.1) по энергоносителю, способу воздействия на свод, конструктивному исполнению и другим признакам [37,93,164,193].

По виду используемой энергии сводообрушители подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические [37,93,164,193,195].

Использование в качестве рабочего тела жидкости в гидравлических или воздуха в пневматических сводообрушителях приводит к необходимости использова-

ния дополнительного оборудования (гидравлических насосов, компрессоров и др.) и многоступенчатому преобразованию энергии [93,252,19].

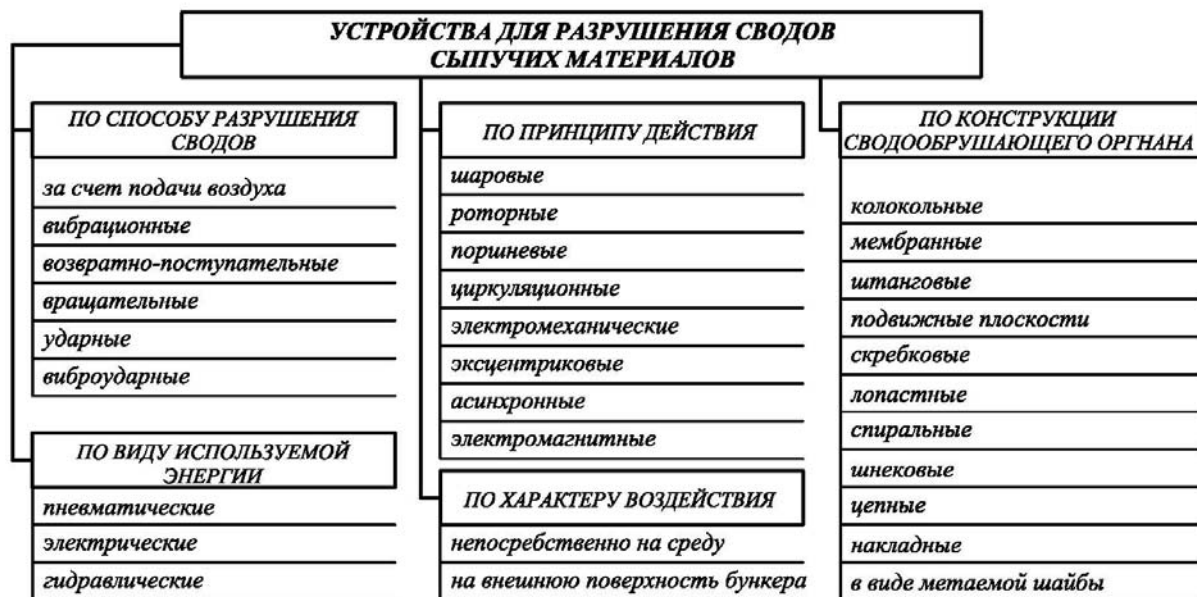


Рис.1.1 – Характерные классификационные признаки приспособлений для сводообрушения

Таким образом в настоящее время перспективным является использование сводообрушителей с электроприводом, которые, например, можно разделить по способу разрушения сводов на:

- вибрационные;
- вращательные;
- возвратно-поступательные;
- ударные;
- виброударные.

Использование вибрационных электромеханических сводообрушителей (например, дебалансных мотор-вибраторов) отрицательно влияет на прочность бункера и снижает его срок службы [37,101,164].

Характерным представляются ударные воздействия по внешней поверхности бункера [193,195].

Электрические ударные машины на базе двигателей с линейной траекторией движения исполнительного органа – ударника – характеризуются простотой конструкции, минимальным числом звеньев кинематической цепи и могут ис-

пользоваться для решения поставленной задачи. Несмотря на относительное многообразие линейных электрических двигателей [1,2,16], на практике обычно используют индукционно-динамические и электромагнитные ударники-побудители [164]. Однако несоответствие характеристик этих изделий особенностям решаемых задач предопределяет невысокую результативность их применения и свидетельствует о необходимости создания специальных импульсных электромагнитных сводообрушителей [37,180,229,245].

В частности, приведенные в работах [37,230] результаты сопоставления основных характеристик показали меньшие в 3 раза энергопотребление и в 1,7 раза металлоемкость импульсных электромагнитных сводообрушителей в сравнении с традиционными электромеханическими (например, резонансным виброобрушителем ЭРВС [37,195], вибратором ИВ-11-50 [195,196] и др.) устройствами, что подтверждает важность и перспективность исследований по разработке и созданию импульсных электромагнитных систем такого назначения.

Возможности использования ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов.

Другая существенно значимая группа операций и процессов, без совершенствования которых невозможно обеспечить перспективу и динамичное развитие агропромышленного комплекса, связана с технологиями обустройства, строительства, реконструкции или ремонта зданий, сооружений, площадок, полигонов и других сравнительно небольших частных и коллективных объектов сельскохозяйственного назначения [259]. Характерными здесь представляются работы и технологии, предполагающие погружение-извлечение в грунт или другую среду коротких устойчивых или длинных, продольно-неустойчивых стержневых элементов: труб диаметром до 100 мм при устройстве неглубоких трубчатых водяных колодцев на отгонных пастбищах или дачных участках, стоек крепления изгороди при оборудовании выгульных площадок и культурных пастбищ, вертикальных заземлителей защитных контуров трансформаторных подстанций, других энергетических объектов. Отличительными свойствами ЛЭМД-привода для таких приме-

нений является автономность энергоснабжения и переносное исполнение элементов привода – электромагнитной ударной машины, управляющего преобразователя, автономного источника питания [83,195,196].

Совершенствование перечисленных операций и процессов применением импульсных электромагнитных систем состоит не только в техническом упрощении, удешевлении, ресурсосбережении, но и улучшении экологии ведения работ, которое достигается использованием при транспортировке этих систем легкового автотранспорта, существенным снижением уровня шума при уменьшении мощности питающих агрегатов и отсутствии выхлопа отработанного воздуха, предотвращением загрязнения почвы утечками масла или при разрыве магистрали.

Так как конструкции стержневых элементов, способы и технические средства для их погружения весьма многообразны, проанализируем их кратко и обозначим задачи по совершенствованию или разработке импульсных мобильных электромагнитных машин и систем для заявленных применений.

Конструкция стержневых элементов и способы их погружения. Металлические стержневые элементы (МСЭ) погружают различными способами, зависящими от их конструкции и размеров, характера грунта и его состояния во время погружения (талый, мерзлый) и от ряда других факторов [50,51,83,133,134].

Стержни из угловой стали и труб любого сечения можно забивать в грунт; вдавливать; закладывать в готовые скважины, а стержни круглого сечения (арматура), кроме перечисленных способов, также и ввертывать в грунт.

Для талых и мягких грунтов наиболее характерными способами погружения стержней являются вдавливание, забивка, ввертывание; для плотных грунтов – забивка МСЭ любого сечения; для мерзлых грунтов – вибропогружение; для скальных – закладка в готовые скважины.

На выбор способа погружения также влияют: время года и климатические условия; взаимная удаленность объектов или от баз механизации; количество стержневых элементов, погружаемых на объекте, наличие и возможность получе-

ния механизмов и приспособлений, необходимых для выбираемого способа погружения.

Выбор способа погружения металлических стержней определяется назначением и условиями работы сооружаемого объекта. В частности, при монтаже вертикальных заземлителей сопротивление растеканию забитого электрода минимальное, в то время как для смонтированного ввертыванием – на 20 – 30% выше, чем у забитого, а у электрода, заложенного в готовую скважину и засыпанного рыхлым грунтом этот показатель может оказаться еще выше, что не позволит ввести электроустановку в эксплуатацию. При вдавливании в грунт сопротивление растеканию увеличивается незначительно и превышает сопротивление забитых электродов на 10 – 15%, однако с течением времени этот показатель выравнивается [50,51,83,133,134].

При устройстве ограждений для культурных пастбищ, монтаже заземлительных устройств, производстве строительных работ для закрепления откосов и т.д. допускается применение стержневых элементов как круглого сечения, так и из квадратной, угловой, швеллерной и другой стали. Чаще всего используют стержни диаметром до 20 мм и элементы из угловой стали сечением 40×40×4 мм или 50×50×5 мм. Стальные трубы, ввиду их дефицитности, обычно не применяют, но использование бракованных водогазопроводных труб представляется вполне целесообразным.

Глубина погружения стержневых элементов также зависит от назначения сооружаемого объекта.

Так, если учесть сезонное промерзание грунта, мало влияющее на углубленные вертикальные заземлители, то можно считать, что в обычных грунтах сопротивление растеканию круглых электродов длиной 5 метров вдвое меньше, чем у заземлителей из угловой стали длиной 2,5 м. Электроды из угловой стали можно сделать углубленными, но для забивки таких заземлителей потребуются сравнительно мощные дорогие механизмы (вибромолоты, копры).

С увеличением глубины погружения приходится увеличивать и поперечное сечение стержня, что ведет к перерасходу металла.

Табл.1.1 – Сравнение показателей металлических элементов

Сортамент стали	Масса стержневого элемента, кг	Время полного разрушения стержневого элемента, лет	Поверхность стержневого элемента, м ²
Сталь прокатная угловая равнобокая №4 сечением 40×40×4	6,0	6,5	0,8
Сталь горячекатаная круглая диаметром 10 мм	3,1	16	0,16

В обычных условиях коррозия незащищенной стали стержневых элементов составляет в земле в среднем 2,5 – 3,0 мм за 8 лет (табл.1.1). Следовательно, угловая сталь толщиной 4 мм (40×40×4), ржавеющая с обеих сторон, за указанный срок полностью выйдет из строя. Если же грунт переувлажнен и в нем имеется много солей и кислот, то время полного разрушения металлического стержня сократится на 2 – 3 года.

Применение стержневых элементов круглого сечения, является наиболее экономичным и эффективным. Так, например, за те же 8 лет стержень из арматурной стали диаметром 10 мм потеряет от коррозии менее половины своего диаметра и будет продолжать работать еще несколько лет.

При одинаковой длине поверхность, разъедаемая ржавчиной у стержневых элементов круглого сечения диаметром 10 мм меньше чем у угловой стали 40×40×4 мм, примерно в 5 раз, что способствует большей долговечности круглых стержней, примерно в 5 раз.

Механизация забивки металлических элементов из угловой стали и труб при помощи копров и вибромолотов ускоряет работы, но не всегда удешевляет монтаж сооружений. Небольшие объемы работ не оправдывают затраты времени и средств на доставку тяжелых механизмов.

Ввертывать и забивать стержневые элементы круглого сечения легче, чем угловую сталь и трубы. Для их погружения можно воспользоваться сравнительно легкими переносными механизированными и даже ручными приспособлениями и погружать электроды гораздо глубже, чем аналогичными устройствами можно забивать угловую сталь и трубы.

Таким образом, применение стержневых электродов круглого сечения в большинстве случаев представляется более эффективным и предпочтительным.

Технические средства и основные требования к устройствам и приспособлениям для погружения стержневых элементов в грунт.

Патентный поиск и анализ литературных источников [20,25,48-51,55,83,94,110,111,117,138,156,195] показывает многообразие технических средств для погружения металлических стержневых элементов в грунт различными способами.

Для обеспечения высоких технико-экономических показателей устройства и приспособления для погружения МСЭ должны соответствовать следующим требованиям:

- допускать автономную работу на необорудованных коммуникациями площадках и обеспечивать при этом нормальную работоспособность;
- обладать простотой и надежностью в работе;
- обеспечивать максимальную безопасность обслуживающего персонала;
- обладать высокими удельными показателями, компактностью, малыми металлоемкостью и энергопотреблением;
- обеспечивать погружение цельных, без наращивания, продольно-неустойчивых стержневых элементов;
- допускать ручную доставку всех элементов к месту работы;
- иметь минимальное время подготовки и запуска в работу;
- сохранять работоспособность в различных природноклиматических условиях.

Определяющими классификационными признаками устройств и приспособлений для погружения стержневых элементов являются их исполнение по способу доставки и установки в рабочее положение – ручные, переносные, навесные, – и виду используемой энергии – пневматические, гидравлические, электрические. Для навесного оборудования также характерно использование привода от вала отбора мощности трактора.

Электрические устройства и приспособления классифицируют по преобразованию первичной энергии в механическую энергию ударной массы:

- с преобразованием вращательного движения электродвигателя в возвратно-поступательное при помощи механических устройств;
- с непосредственным преобразованием электрической энергии в кинетическую энергию движения по линейной траектории.

По энергообеспечению электрические устройства можно разделить на автономные, питаемые от бензоагрегатов или химических источников тока и стационарные, подключаемые к стационарным сетям переменного тока напряжением 220/380 В.

Классификация традиционных устройств для погружения металлических стержневых элементов в грунт представлена на рис.1.2.

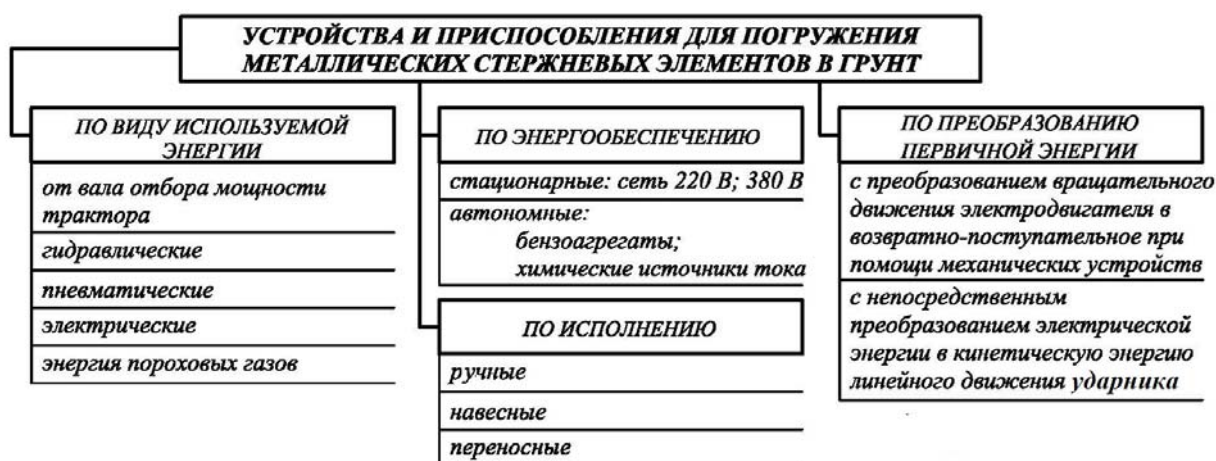


Рис.1.2 – Классификация устройств и приспособлений для погружения стержневых элементов в грунт

Отличительные свойства существующих технических средств для погружения металлических стержневых элементов в грунт представляются следующим образом.

Навесные приспособления для погружения металлических стержневых элементов. В районах с сухими грунтами, залегающими на большую глубину, металлические стержни погружают при помощи навесных приспособлений. Предназначенная для погружения металлических элементов машина УЗК-2 снабжена канавокопателем и бульдозерным отвалом для рытья и засыпки траншей, вибро-

лотом для забивки стержней, сварочным аппаратом для сварки и смонтирована на базе трактора Т-40.

Табл.1.2 –Техническая характеристика навесного оборудования для ударного погружения стержневых элементов в грунт

Показатели	УЗК-2	АКР-120	ВП-20
Диаметр стержня, мм	15 – 16	14 – 18	16 – 20
Глубина погружения, м	5	5	18
Время погружения, мин	5 – 7	3 – 5	15 – 20
Оборудование на базе трактора	Т-40	ДТ-75НВ	ДТ-75

Другой агрегат – комплексный, для установки ригелей к опорам линий электропередач, устройства заземлений и т.д. – типа АКР-120 предназначен для рытья и засыпки траншей, подъема, перемещения и установки ригелей и др. рентабельны лишь при большом объеме работ, обеспечивающем их полную загрузку. Основные технические характеристики навесного оборудования для ударного погружения металлических стержней в грунт представлены в таблице 1.2 [50-52,83,195].

Приспособления для ручной забивки металлических стержневых элементов.

Если механизированный инструмент недоступен, то при монтаже небольшого числа стержней допустим ручной труд.

Иногда металлические стержни забивают кувалдой. Однако этот способ весьма трудоемок, и с его помощью трудно забить МСЭ на нужную глубину. Бригада из 4 – 5 человек за полный рабочий день забивает всего 10 – 15 металлических элементов на глубину до 3 м. В плотный, а тем более в мерзлый грунт забить стержни, чаще всего, вообще не удается. При погружении даже коротких стержневых элементов длиной всего 2 м требуются подмости для рабочих. Верхние концы металлических элементов быстро разбиваются, что затрудняет дальнейшее их погружение. Кроме больших затрат труда и времени, это приводит к перерасходу металла.

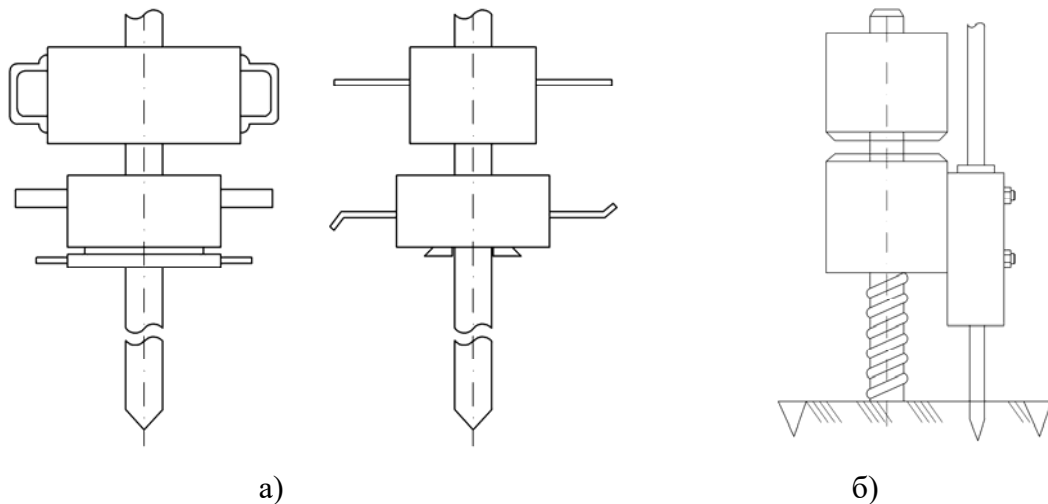


Рис.1.3 – Приспособления для ручного погружения стержневых элементов в грунт

Приспособление, работающее подобно копру (рис.1.3,а), облегчает труд, увеличивает глубину погружения и обеспечивает экономию металла за счет применения сравнительно тонких металлических элементов, недостаточно прочных для случая забивки кувалдой. На стержень надевают зажимное устройство с корпусом-наковальней, воспринимающей удары. Выше зажимного устройства надевают ударник-болванку массой 15 – 25 кг с ручками для ее подъема двумя рабочими. Для демонтажа, забитого МСЭ, приспособление снимают со стержня и устанавливают его в обратном порядке: ближе к земле – болванку, а выше – наковальню. Для извлечения стержня удары наносятся снизу-вверх [50,51,195].

Другое устройство, позволяющее забивать сравнительно тонкие стержневые элементы, представлено на рис.1.3,б. Здесь использован автоматический зажим, через который пропускается металлический элемент. Приспособление опирается на грунт, что создает меньшие изгибающие нагрузки на погружаемый стержень и позволяет применять электроды диаметром 12 – 14 мм, существенно снижая затраты металла.

Основными недостатками ручной забивки являются большие затраты времени для погружения одного стержня, малая глубина забивки, невозможность погружения в мерзлые и плотные грунты.

Переносные устройства для погружения металлических стержневых элементов. Использование в качестве погружателей металлических стержневых эле-

ментов переносных пневматических, гидравлических, электрических и других устройств, является наиболее предпочтительным [19,25,48,50,51].

Надежность, долговечность и полная электробезопасность пневматических механизмов делают их применение безальтернативным на тех объектах, где имеются источники сжатого воздуха. Стержни погружают пневмомолотками, серийно выпускаемыми заводами [25,49-51,94,156]. Для включения в работу одновременно 2-3 и более пневмомолотков необходимо использовать передвижной компрессор. При этом продольно-неустойчивые стержни предварительно заготавливают отрезками длиной по 2 метра и к концу каждого отрезка приваривают муфту. После погружения отрезка в муфту вставляют нижний конец следующего отрезка, приваривают его поперечным и продольным швами к забитому МСЭ и продолжают погружение.

Забивка пневмомолотками является вполне эффективной. Однако работа по изготовлению муфт и необходимость иметь прочные и устойчивые козлы для удержания пневмомолотка на стержне ведет к увеличению затрат и времени погружения.

В лаборатории ИГД СО РАН (г. Новосибирск) созданы пневматические забивные машины серии ПУМ, обладающие высокими удельными энергетическими показателями, приспособленные для работы в закрытых помещениях и на стройплощадках. Их преимущество – не только погружение, но и извлечение стержней.

Основные показатели и технические характеристики пневмоударных машин серии ПУМ (рис.1.4,а) приведена в таблице 1.3 [25,156,195].

Табл.1.3 – Основные показатели и технические характеристики пневмоударных машин серии ПУМ

Показатели	ПУМ-3	ПУМ-35	ПУМ-65
Энергия удара, Дж	40	100	180
Частота ходов, Гц	9	10	9
Давление сжатого воздуха, МПа	0,6	0,6	0,6
Расход воздуха, м ³ /мин	1,5	2,5	4,5
Масса, кг	18	30	60
Диаметр погружаемого стержня, мм	12 – 20	20 – 30	35 – 65
Глубина погружения, м	5	6	8

Сравнительно небольшая масса машины позволяет использовать ее без применения грузоподъемных механизмов или подмостей-козел, необходимых при работе пневмомолотками. Зажимное приспособление обеспечивает автоматическую перестановку машины на стержне и не требует контакта рабочего с машиной при забивке, улучшая тем самым условия труда и безопасность.

Недостатки пневмоударных машин состоят в многоступенчатости энергопреобразовательных процессов, существенном расходе рабочей среды, наличии пневмопроводов и компрессоров, значительном шуме и др.

При отсутствии компрессора или пневмосети можно использовать приспособления с приводом от небольшого бензинового двигателя (ДВС). Заводами серийно выпускаются устройства для ввертывания стержней круглого сечения ПЗД-12 и модернизированное ПЗД-12У1 (рис.1.4,б), выполненные на базе двухтактного бензодвигателя «Дружба» [50,83,195]. При осевом нажатии на рукоятку приспособления происходит автоматический захват стержня вращающимся кулачковым зажимом и, при наличии усилия подачи, обеспечивается погружение. Глубина для приспособлений серии ПЗД составляет 5 – 6 метров.

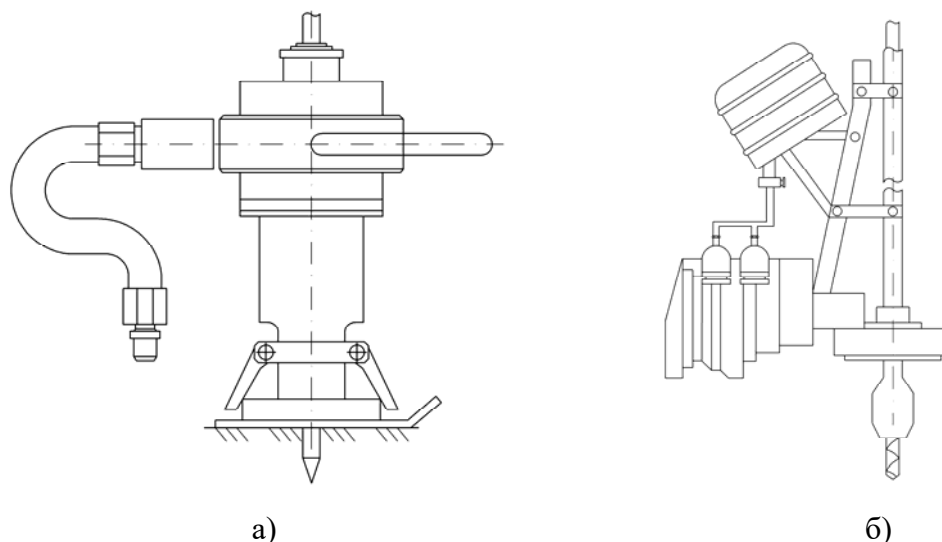


Рис.1.4 – Устройства для погружения металлических стержней в грунт: пневмоударная машина ПУМ-3 (а); бензомоторный погружатель ПЗД-12У1 (б)

Большую величину погружения обеспечивают вращательные устройства серии ПБУ. Из-за большой массы и значительной мощности бензомоторный механизм заглубляет электроды диаметром 18...20 мм до 10 м. Технические данные приспособлений с бензодвигателями приведены в таблице 1.4 [83,195].

Табл.1.4 – Техническая характеристика приспособлений с бензодвигателями для ввертывания стержневых элементов

Показатели	ПЗД-12У1	ПБУ-10
Диаметр погружаемого стержня, мм	12 – 16	12 – 20
Глубина погружения, м	До 5	До 10
Частота вращения, об/мин	540	80 – 200
Скорость погружения, м/мин	0,5 – 1,9	0,9 – 2,4
Масса, кг	21	36

Наряду с пневматическими или ДВС выпускаются погружатели с электроприводом. Заводами выпускаются машины типа ПЗ-12 (рис.1.5,а) для погружения стержней, оснащаемые приводом от электросверлилки типа И-18А мощностью 600 Вт при напряжении 220 В переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц. Стержень пропускается гладким концом через зажим приспособления в осевой канал, чтобы заостренный конец длиной 1,3–1,5 м оставался свободным. При включении электрозаглубителя элемент захватывается кулачковым зажимом и, вращаясь, погружается в грунт. Ввертывание такими машинами не допускает значительной глубины погружения. Увеличение глубины достигается при ударном или вибрационном воздействии на стержень.

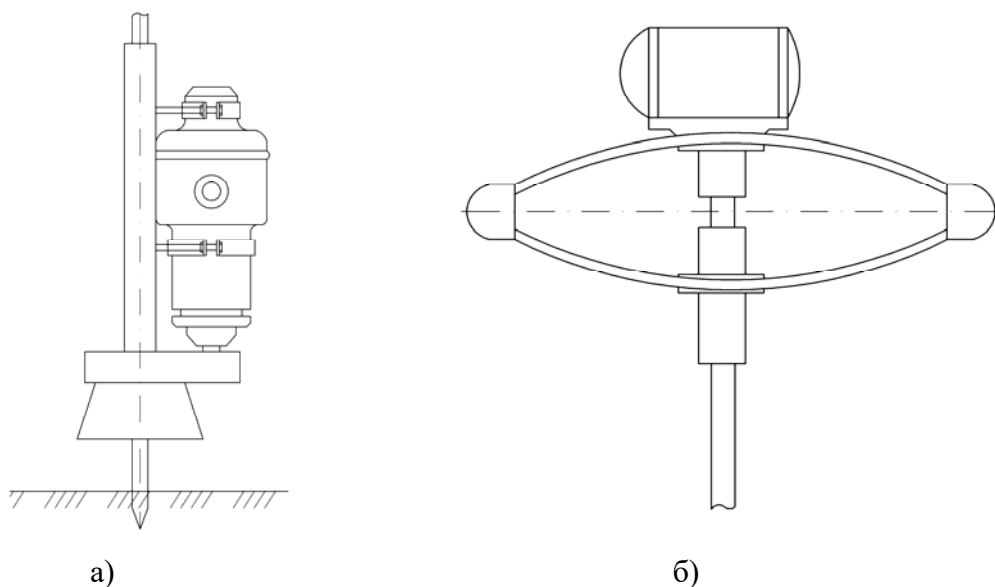


Рис.1.5 – Электрические устройства для погружения металлических стержней в грунт: электрозаглубитель стержневых элементов ПЗ-12 (а); электровибропогружатель стержневых элементов С-414 (б)

Воронежскими инженерами был разработан электровибропогружатель С-414 (рис.1.5,б) с электродвигателем мощностью 0,8 кВт, для сравнительно слабых грунтов (песок) [83,51,195]. Небольшая масса приспособления позволяет одному

– двум рабочим устанавливать его вместе со стержнем в рабочее положение вручную. Для более плотных грунтов (суглинок, глина) применяют упрочненный электровибратор типа С-624, имеющий массу 100 кг электродвигатель 1,2 кВт. Для подъема устройства на высоту до 3,5 м используют подъемную лебедку.

Большинство электровибрационных погружателей позволяют заглублять металлические стержни торцевым способом, что затрудняет их применение для забивки длинных продольно-неустойчивых элементов.

Приведенный краткий обзор способов и технических средств для работы с различными стержневыми элементами подтверждает как относительное разнообразие, так и неполное соответствие существующих устройств и приспособлений сформулированным требованиям и необходимость дальнейших исследований по разработке и созданию импульсных электромагнитных машин и систем с перечисленными отличительными свойствами для применения на объектах АПК. В частности, в работах [37,83,149,195] приведены отличительные признаки линейных электрических двигателей для создания таких машин и выполнено сравнение среднего энергопотребления и продолжительности погружения продольно-неустойчивых стержней ударными машинами С-414, С-642, вращателями ПЗ-12 и импульсной электромагнитной машиной, свидетельствующее о перспективности использования последней.

Табл.1.5 – Среднее потребление электрической энергии при погружении металлического стержневого элемента в грунт

Показатели	Устройства для погружения стержней в грунт			
	ПЗ-12	С-141	С-642	ЛЭМД-привод
Продолжительность забивки t , с	300	220	150	90
Энергопотребление, кДж	180	176	180	100

В частности, установлено, что среднее потребление электрической энергии и продолжительность погружения одного стержня импульсным электромагнитным приводом в 1,7 – 1,8 и в 2 – 3 раза, соответственно, меньше в сравнении с серийно выпускаемыми ударными машинами и машинами вращательного действия (табл.1.5).

Определяющей характеристикой ударных машин служит энергия удара, зависящая от предударной скорости якоря-бойка. Однако на начальном этапе проектирования ударной машины с ЛЭМД величина этой энергии, как правило, неизвестна и зависит от массы и геометрических параметров забиваемых стержней, состояния и характеристик грунта и т.д., то есть определяется условиями забивки.

Для приближенного определения энергии удара A_y воспользуемся рекомендациями [195,196,230]. Уравнение, связывающее величину A_y электромагнитной машины с параметрами забиваемого стержня и характеристиками грунта, будет иметь вид:

$$A_y = [S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y] / [\eta - (\rho \cdot \sin \alpha \cdot S \Delta Y / (m_c + m_b))], \quad (1.1)$$

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

Поскольку, геометрические характеристики стержневого элемента при погружении не меняются, обозначим

$$\sin \alpha \cdot S / (m_c + m_b) = \kappa_z, \quad (1.2)$$

тогда с учетом (1.1) получим

$$A_y = [S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y] / [\eta - \kappa_z \rho \Delta Y]. \quad (1.3)$$

Из выражения (1.3) видно, что при заданных геометрических параметрах забиваемого стержня энергия удара A_y электромагнитной машины с ЛЭМД определяется характеристиками грунта и суммарным заглублением стержня. Рассчитанная по (1.3) энергия удара A_y является исходной величиной при определении основных конструктивных параметров электромагнитной ударной машины. Расчеты показали, что для погружения, например, стержневых заземлителей диаметром 12 – 18 мм на глубину до 3,5 м в грунт с плотностью 1300 – 1600 кг/м³ $A_y = 25 \dots 50$ Дж.

1.1.2 ЛЭМД-привод для безударных процессов и технологий

ЛЭМД-привод кормораздаточных транспортеров. Характерной технологической операцией в животноводстве является кормораздача, занимающая до 60 % трудозатрат 40 % ресурсов.

Классификационные признаки кормораздаточных машин приведены на рис.1.6 [18,36,90,91,98,124].



Рис.1.6 – Классификация механизированных средств доставки и раздачи кормов

В работах [18,124] показано, что сельскохозяйственному производству необходимы кормораздаточные машины, обеспечивающие выдачу различных по виду и консистенции кормов.

В классификации (рис.1.6) интерес представляют устройства, оснащенные ЛЭМД-приводами, предпочтительные в стационарных кормораздатчиках, например, тросошайбовых, штанго-шайбовых. В работе [124] выполнено сравнение характерных электроприводов транспортеров и показана перспектива применения ЛЭМД-приводов по выбранным критериям [67,53].

В развитие результатов проведем сравнение по условному коэффициенту оптимального применения K_{on} , который определяется отношением суммы коэффициентов оценки Σk_{oi} электродвигателей к сумме максимальных значений коэффициентов оценки $\Sigma k_{o.max}$ [53]:

$$K_{on} = \Sigma k_{oi} / \Sigma k_{o.max}. \quad (1.4)$$

Представим результаты расчетов в виде диаграммы (рис.1.7).

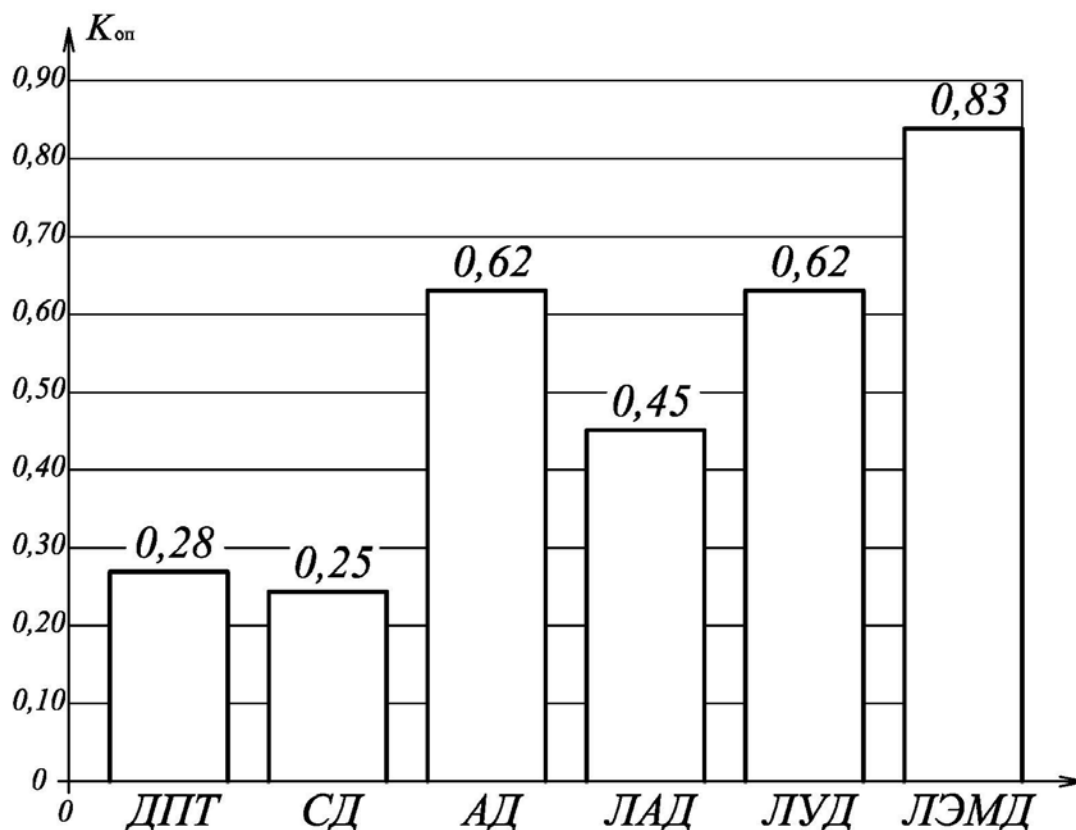


Рис.1.7 – Диаграммы коэффициентов оптимального применения различных типов электродвигателей K_{on} : ДПТ – двигатель постоянного тока; СД – синхронный электродвигатель; АД – асинхронный электродвигатель; ЛАД – линейный асинхронный двигатель; ЛУД – линейный управляющий двигатель; ЛЭМД – линейный электромагнитный двигатель

Предварительный анализ показал, что в приводе кормораздаточных транспортеров предпочтительным является использование ЛЭМД [124].

Наглядное представление об упрощении привода с линейным электромагнитным двигателем по сравнению с асинхронным двигателем показано на структурных схемах (рис.1.8).

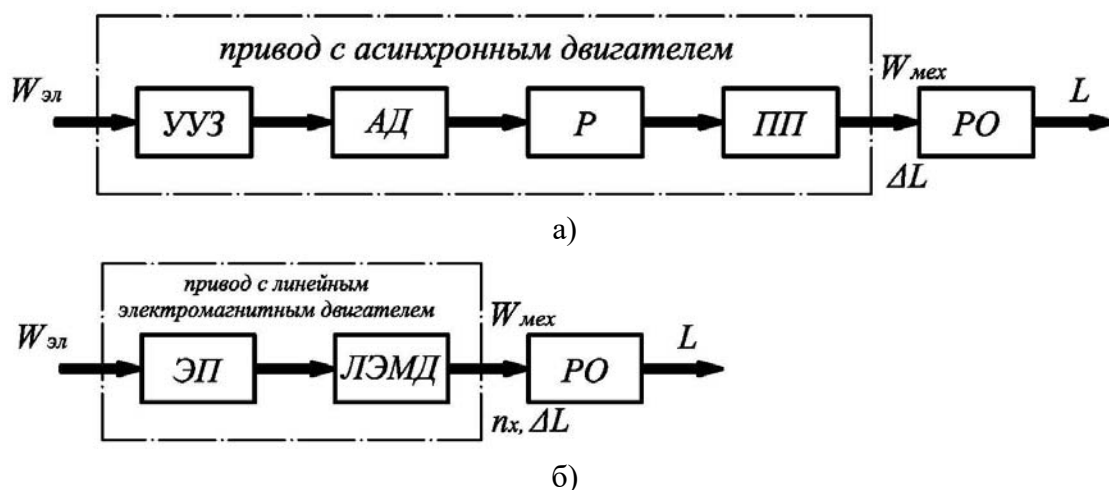


Рис.1.8 – Функциональная схема приводов кормораздатчиков:

а) с двигателем вращательного действия (АД – электродвигатель, УУЗ – пускорегулирующее устройство, Р, ПП – трансмиссия (редуктор и передача механической энергии), РО – собственно транспортер); б) ЛЭМД-привод (ЭП – электрический преобразователь)

При выборе электродвигателя немаловажным фактором является его надежность, а также надежность технологических узлов, которые с ним непосредственно связаны [212,213].

Табл.1.6 дает наглядное представление о преимуществах привода с линейным электромагнитным двигателем по сравнению с асинхронным двигателем. Сопоставим надежность приводов с АД вращательного действия и приводов с ЛЭМД, установленных в приводе кормораздатчика, по характеристике «вероятность отказов работы $Q(t)$ ». При этом будем учитывать неисправности, возникающие как в самом двигателе, так и в элементах трансмиссии [38,124].

Табл.1.6 – Сравнение традиционных и линейных приводов

Факторы, характеристики	Традиционные приводы с АД	Приводы с ЛЭМД
1	2	3
Промежуточные элементы передачи к РО	Ротор двигателя, вал, шкив, ремень, шкив	Нет
Передача энергии на РО	От статора электродвигателя на ротор, через вал ротора на шкив, на ходовой винт, на рабочий орган	Нет
Потери на трение	Подшипники ротора, ременная передача, подшипники ходового винта, шарики, плоскости профиля канавки гайки	Нет
Элементы с упругими деформациями	Вал ротора, ремень шкива, вал винта, плоскости профиля канавки винта, шарики, плоскости профиля канавки гайки	Нет

1	2	3
Элементы с температурными деформациями в приводе	Ротор двигателя, вал ротора, подшипники ротора, шкив, ремень, шкив, подшипники винта, винт, шарики, гайка	Нет
Изнашиваемые элементы привода	Подшипники ротора электродвигателя, шкив, ремень, шкив, подшипники винта, ходовой винт, шарики, гайка	Нет
Обязательные зоны для смазки	Подшипники ротора, подшипники винта	Нет
Элементы, создающие инерционные нагрузки при ускорениях и реверсе	Вращающийся ротор, вал ротора, внутренние кольца подшипников вала ротора, шкивы, ремень, подшипники винта, винт, гайка и шарики в поступательном движении	Цилиндрический, комбинированной формы якорь
Основные зоны загрязнения (уровень сложности очистки)	Подшипники вала ротора двигателя (сложно), подшипники ходового винта (сложно)	Зазор между статором и плоским ротора (просто)

Вероятность безотказной работы приводов согласно [38,161]:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЛЭМД}(t) &= \sum_i Q_{ЛЭМД}^u \cdot \sum_i Q_{ЛЭМД}^h \\ Q_{АД}(t) &= \sum_i Q_{АД}^u \cdot \sum_i Q_{АД}^h \end{aligned} \right\}, \quad (1.5)$$

где $Q^u(t)$ – вероятность безотказной работы привода с АД $Q_{АД}^u(t)$ и ЛЭМД $Q_{ЛЭМД}^u(t)$; $Q^h(t)$ – вероятность независимых отказов привода АД $Q_{АД}^h(t)$ и с ЛЭМД $Q_{ЛЭМД}^h(t)$.

Представим уравнение в виде [74,100]:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЛЭМД}(t) &= \sum_i Q_{ЛЭМД}^u \cdot \sum_i Q_{ЛЭМД}^h = (Q_{об.ст}^u(t) + Q_{взм}^u(t) + Q_{yy}^u(t) + Q_{кз}^u(t) + Q_{np}^u(t) + Q_{3X}^u(t)) \times \\ &\times (Q_{об.ст}^h(t) + Q_{взм}^h(t) + Q_{yy}^h(t) + Q_{кз}^h(t) + Q_{np}^h(t) + Q_{3X}^h(t)); \\ Q_{АД}(t) &= \sum_i Q_{АД}^u \cdot \sum_i Q_{АД}^h = (Q_{об.ст}^u(t) + Q_{т.к}^u(t) + Q_{взм}^u(t) + Q_{н}^u(t) + Q_{офр}^u(t) + Q_{yy}^u(t) + Q_{кз}^u(t) + Q_{np}^u(t) + Q_{3X}^u(t)) \times \\ &\times (Q_{об.ст}^h(t) + Q_{т.к}^h(t) + Q_{взм}^h(t) + Q_{н}^h(t) + Q_{офр}^h(t) + Q_{yy}^h(t) + Q_{кз}^h(t) + Q_{np}^h(t) + Q_{3X}^h(t)), \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

где $Q_{об.ст}^u(t)$, $Q_{т.к}^u(t)$, $Q_{взм}^u(t)$, $Q_{н}^u(t)$, $Q_{офр}^u(t)$, $Q_{yy}^u(t)$, $Q_{кз}^u(t)$, $Q_{np}^u(t)$, $Q_{3X}^u(t)$ – неисправность статорной обмотки, износ подшипников, замыкания в статоре, несоосность рабочей машины и электродвигателя, неисправность роторной обмотки, дефект управляющего устройства, неисправность контактных или полупроводниковых коммутаторов, неисправность заклинивающего исполнительный органа механизма, прочие дефекты и неисправности.

Значения вероятностей отказов из-за этих неисправностей, выявленные при эксплуатации оборудования, приведены в табл.1.7:

Табл.1.7 – Вероятность отказов для приводов с АД и ЛЭМД

Вид неисправности		Вероятность отказов	
		Для привода с АД	Для привода с ЛЭМД
1	2	3	4
Неисправность статорной обмотки	$Q_{об.ст}^u(t)$	0,31	0,31
Износ подшипников	$Q_{т.к}^u(t)$	0,04	—
Несоосность рабочей машины и электродвигателя	$Q_n^u(t)$	0,02	—
Замыкания в статоре	$Q_{взст}^u(t)$	0,24	0,24
Дефект управляющего устройства	$Q_{уу}^u(t)$	0,08	0,08
Неисправность контактных или полупроводниковых коммутаторов	$Q_{кэ}^u(t)$	0,06	0,06
Неисправность роторной обмотки	$Q_{офр}^u(t)$	0,19	—
Неисправность заклинивающего исполнительного органа механизма	$Q_{зх}^u(t)$	—	0,25
Прочие дефекты и неисправности	$Q_{np}^u(t)$	0,06	0,06

Сравнение кривых 1, 2 (рис.1.9) показывает, что среднее время наработки на отказ приводов с ЛЭМД $T_{CP}^{ЛЭМД}$ больше на $\Delta T \approx 20...30\%$, чем для приводов с асинхронным двигателем $T_{CP}^{АД}$, при прочих равных условиях [74,100].

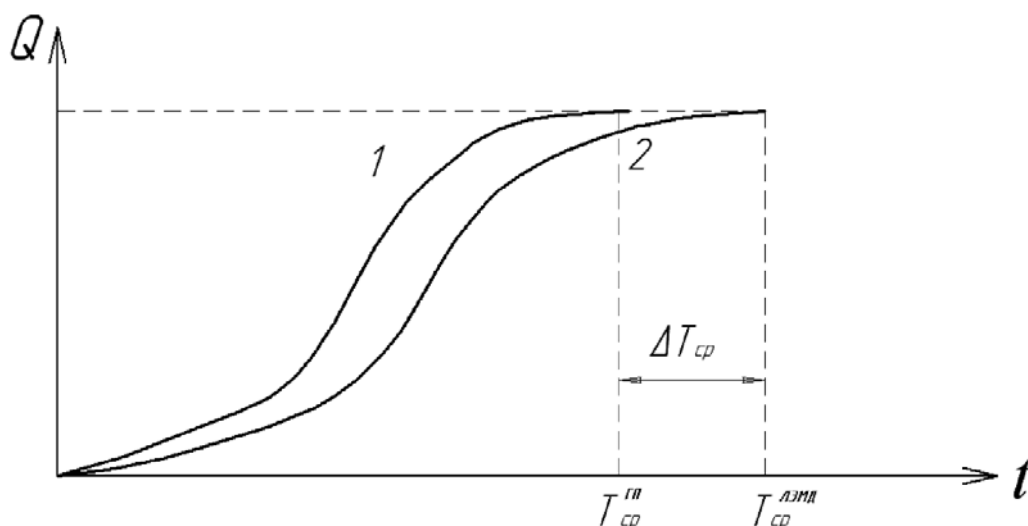


Рис.1.9 – Вероятность отказа привода с АД (1) и ЛЭМД (2).

Сопоставление характеристик оборудования (табл.1.8) подтверждает целесообразность использования безударных ЛЭМД-приводов, например, кормораздаточных транспортеров [124,212,213].

Табл.1.8 – Основные характеристики кормораздатчиков

Тип кормораздатчика	РКА1000		ТШ-2		РТШ-1		РКС 3000		ACO funto		Egebjerg	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тип привода Показатели	АД	ЛЭМД	АД	ЛЭМД	АД	ЛЭМД	АД	ЛЭМД	АД	ЛЭМД	АД	ЛЭМД
Производительность, т/ч	0,729	1,1	2,86	2,86	1,4	1,4	5	5	1	1	1	1
Скорость перемещения рабочего органа, м/с	0,089	0,12	0,81	0,81	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
Мощность электродвигателя, кВт	3	2,35	4	3	1,7	1,24	3	2,2	1,5	1,1	1,5	1,1
Масса приводной станции, кг	125	25	200	35	268	20	230	32	64	30	66	30
Продолжительность рабочего цикла, мин	15,6	12,2	6,17	6,17	17	17	6,4	6,4	6	6	6	6
Затраты электроэнергии при одном цикле кормления, кВт*ч	0,78	0,47	0,41	0,31	0,48	0,35	0,32	0,23	0,15	0,11	0,15	0,11
Тяговое усилие Н	927	927	2519	2519	957	957	1894	1894	908	908	908	908
Удельная сила Н/кг	7,416	37,08	12,56	71,98	3,57	47,8	8,2	59,2	14,2	30,3	13,7	30,3
Удельная производительность т/кВт*ч	0,24	0,47	0,72	0,95	0,82	1,13	1,67	2,28	0,67	0,91	0,67	0,91

Сравнение показывает, что эти приводы обладают преимуществами по ряду показателей, в частности [18,90,91,98,124]:

- по затратам электроэнергии в 1,8-2,8 раза;
- по удельной производительности в 1,4-2,8 раза;
- по времени наработки на отказ на 20 – 30%;
- по удельной мощности в 1,4-2,7 раза;
- по удельной силе в 4,9-13 раз.

ЛЭМД-привод прессов для отжимания сока. Одним из важнейших направлений в развитии пищевой промышленности, на сегодняшний день, является производство натуральных соков и нектаров. Правильная организация процесса, рациональный подбор технических средств и режимов существенно

влияет на выход готовой продукции, её качество и свойства, а также на эксплуатационные затраты.

Переработка плодов на сок включает в себя несколько этапов: подготовка сырья для извлечения сока; получение сока; повышение качества продукта [143,152,159,172,174].

Подготовка сырья может включать в себя ряд операций, например, дробление, тепловая обработка, замораживание, обработка ионизирующим излучением, обработка электрическим током, применение облегчающих веществ, обработка ферментами и др. [152,172,174,181,191].

В табл.1.10 представлены наиболее распространённые способы и технические средства, применяемые при предварительной обработке сырья. Классификационные признаки плодотжимающих машин показаны на рис.1.9.

Табл.1.9 – Технические средства предварительной обработки плодов

Способ	Марки машин	Страна производитель
Дробление	Дробилки: Д1 – 75; РЗ – ВДМ; ВДВ – 5; ВДФ10,20.	Россия
	Дробилка-насос: «Централь» - Бухер – Туйер АГ.	Швейцария
Тепловая обработка	Мезгоподогреватель: ВПМ-20 Теплообменник: «Альфа-Лавель»	Россия Швейцария
Электрический	ЭлектроплазмORIZаторы: ЭВ-1; А9-КЭД; «Плазмолиз-2М»	Россия
Ферментная обработка	Пентаваморин П10-х Пентофатидин П10-х	Россия

Диффузионным способом получают концентрированный сок в специальных аппаратах – экстракторах, в которых происходит выщелачивание водой экстрактивных веществ из плодовой мезги. Для такого способа характерным является невысокое качество получаемого сока за счет его обогащения взвесями и экстрактивными веществами, что требует дополнительной его очистки.

Способ центрифугирования основан на использовании центробежной силы. При высокой скорости вращения из мезги выделяется сок, который собирается затем в специальные емкости. Наиболее эффективными являются шнековые фильтрующие центрифуги, выход сока из которых составляет около 50 % [174,181].

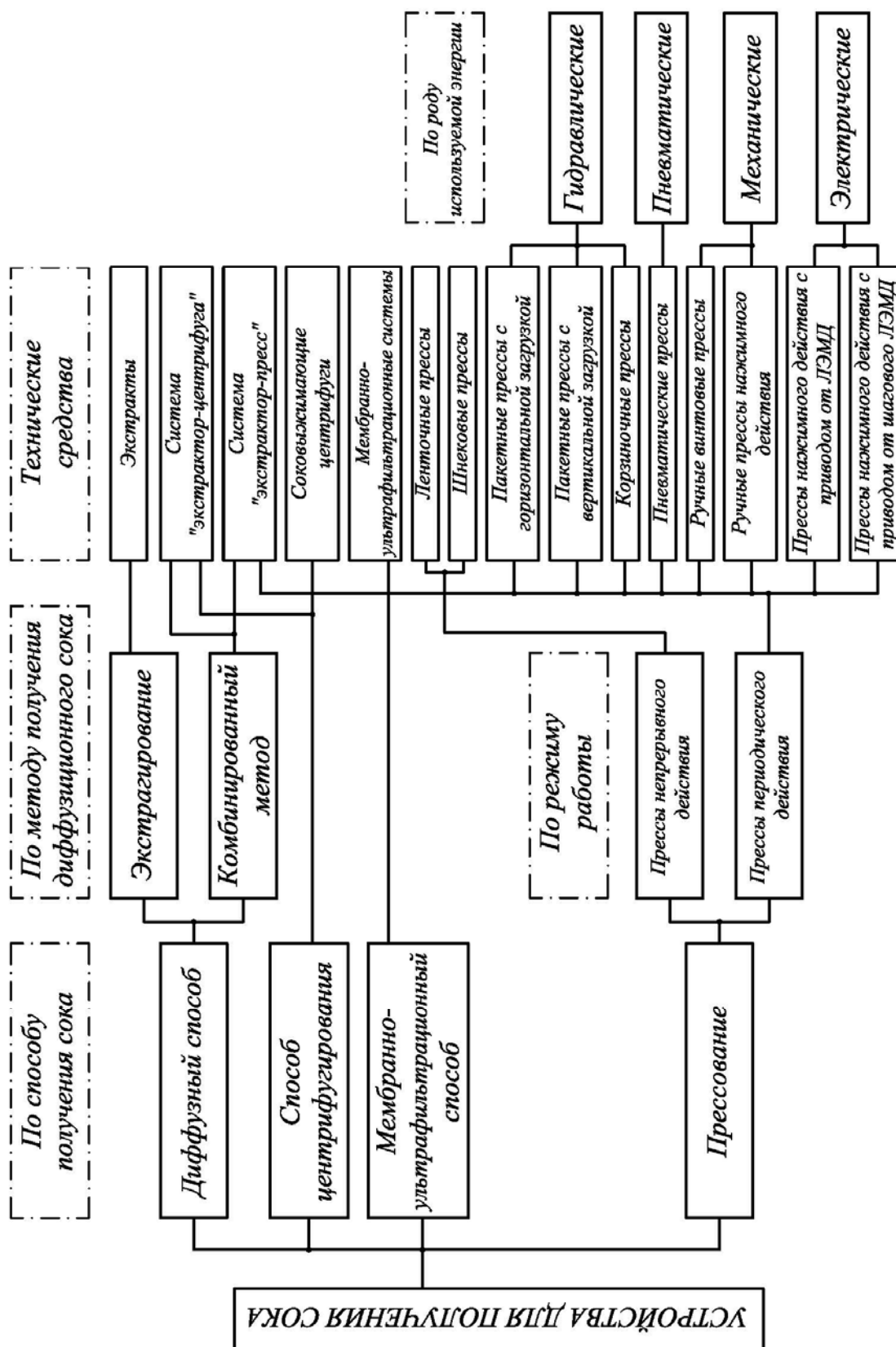


Рис.1.10 – Классификация устройств для получения сока из плодовоощного сырья (мезги)

Мембранно-ультрафильтрационным способом получают сок высокого качества путем пропускания подготовленной мезги через систему ультрафильтров и мембран. Недостатки этих систем подробно рассмотрены в работах [174,191].

В большинстве случаев из мягких плодов получают прессованием. Характеристики некоторых изделий для выполнения этой операции показаны в табл.1.10.

Табл.1.10 – Показатели изделий для отжима сока

Вид привода прессового оборудования	Диапазон усилий, Н	Диапазон величин рабочих ходов, мм	Выход сока, %	Масса, кг
Гидравлический	$(1,1 \div 25) \cdot 10^4$	20÷450	70÷80	350÷1300
Пневматический	$(1,5 \div 10) \cdot 10^4$	25÷120	до 76	50÷650
Механический (ручной)	$5 \times 10^3 \div 3 \times 10^4$	2÷100	менее 50	1÷40
Электромагнитный	$5 \times 10^2 \div 10^4$	5÷50	до 80	20÷60

Использование гидравлических и пневматических прессов представляется вполне эффективным. Однако многоступенчатое преобразование первичной энергии, относительно низкий КПД, обязательное наличие дополнительного оборудования (насосов, компрессоров и др.), а также сложность обеспечения надежной работы таких прессов ограничивает их использование в небольших цехах по переработки плодов на сок [174,191].

Перспективным направлением совершенствования прессов для переработки плодов прессов является использование линейного электрического привода на базе электромагнитного двигателя [105,147,149-151,181].

Сравнение показывает, что электрические прессы с линейным электромагнитным приводом являются наиболее предпочтительными [105,149]. Масса таких прессов в 3...20 раз меньше чем у пневматических и гидравлических. Их характеристики показаны в табл.1.10.

Структурная схема, представленная на рис.1.11,а, поясняет особенности ЛЭМД-привода устройства для отжимания сока.

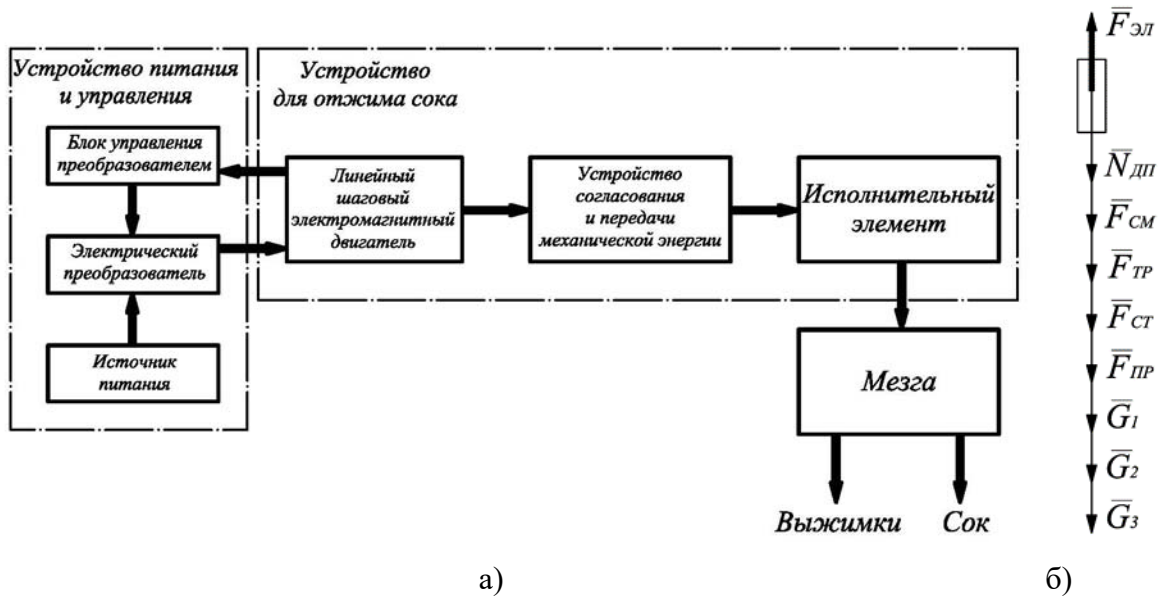


Рис.1.11 – Структурная схема пресса с электромагнитным приводом (а), расчетная схема сил линейного электромагнитного двигателя (б)

Необходимое для прессования усилие с учетом рис.1.11,б определяется выражением:

$$F_m = m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + N_{дп} + F_{см} + F_{тр} + F_{ст} + F_{пр} + G_1 + G_2 + G_3, \quad (1.7)$$

где F_m , $F_{см}$, $F_{тр}$, $F_{ст}$, $F_{пр}$, $N_{дп}$, $G_1 \dots G_3$ – сила соответственно тяги линейного электромагнитного двигателя; сопротивления продукта; трения; сопротивления заклинивающих элементов; упругости возвратного элемента; реакции опоры исполнительного органа; тяжести подвижных элементов электромагнитной машины; m – масса якоря с исполнительным органом.

Тогда значение $F_{отж}$, необходимое для получения сока определяется по выражению:

$$F_{отж} \geq F_m = m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) - N_{дп} - F_{см} - F_{тр} - F_{ст} - F_{пр} - G_1 \quad (1.8)$$

Расчет, приведенный в [174], свидетельствует, что необходимо усилие в диапазоне $F_{отж} = 1 \dots 3$ кН.

ЛЭМД-привод установок шприцевания колбасного фарша. Одним из основных условий для решения проблем обеспечения качественной сельскохозяйственной продукцией является внедрение новых и совершенствование имеющихся технических средств.

В частности, среди многочисленных технологических процессов, выполняемых при производстве колбасных изделий (КИ) (колбасы, сосиски, сардельки) (рис.1.12) операции, связанные с формованием, являются наиболее распространёнными и энергоёмкими, их комплексная механизация и автоматизация имеет важное значение, обусловленное существенными объёмами выполняемых работ [31,57,61,66,68].

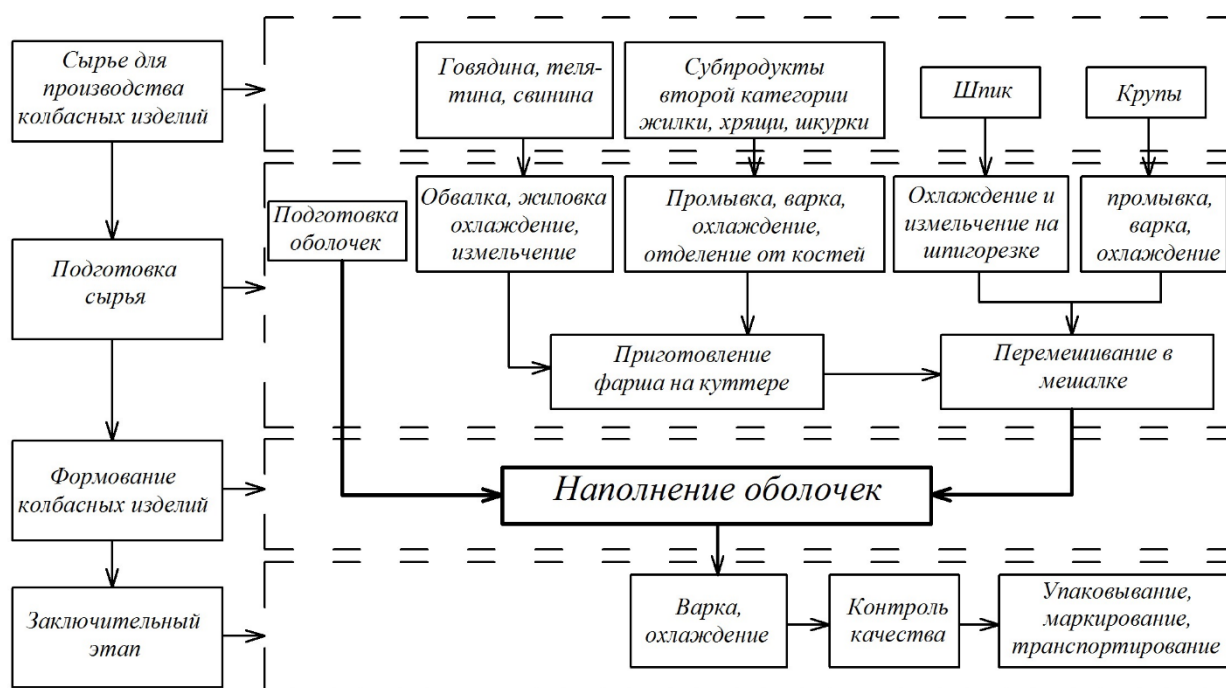


Рис.1.12 – Технологическая схема производства колбас

При этом задачу повышения качества выпускаемой продукции с одновременным увеличением объема ее производства можно решить совершенствованием существующих и внедрением новых технических средств производства, прежде всего, в результате создания современного оборудования, обеспечивающего точное соблюдение всех требований технологии.

Машины и аппараты должны оказывать на обрабатываемый продукт такое воздействие, при котором потери сырья и готовой продукции будут минимальными. Это обеспечивается соответствием скоростей и траектории движения рабочих

органов машин и аппаратов, выбору физико-химических свойств исходных, промежуточных, конечных продуктов и режима процесса их переработки [31,61].

Процесс шприцевания заключается в заполнении оболочки мясным продуктом и осуществляется под давлением в специальной машине-шприце, общий вид которой представлен на (рис.1.13). В процессе шприцевания фарш загружают в загрузочную воронку, который с помощью транспортирующего органа подаётся к цевке, через которую поступает в оболочку. Отдельные виды КИ рекомендуется шприцевать при строго определённых давлениях (табл.1.11) [61,66].

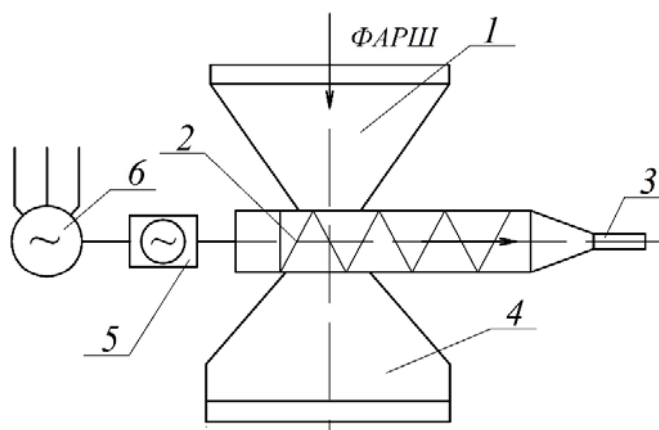


Рис.1.13 – Общий вид шприца для шприцевания колбасных изделий: 1 – загрузочная воронка; 2 – транспортирующий орган; 3 – цевка; 4 – станина; 5 – устройство согласования и передачи крутящего момента; 6 – привод.

Плотность набивки фарша в оболочку регулируется оператором. Например, излишняя плотность набивки варёных колбас приводит к повреждению и разрыву оболочки во время варки батонов вследствие расширения содержимого. Копчёные колбасы, наоборот, шприцуют с наибольшей плотностью, так как объём батонов значительно уменьшается в результате последующей сушки изделий.

Табл.1.11 – Величины давления шприцевания для колбасных изделий

Виды колбасных изделий	Давление шприцевания P , МПа
Сосиски	3,9 – 4,9
Колбасы варёные	4,9 – 5,9
Полукопчёные	5,9 – 7,8
Копчёные	0,5 - 1,2
Сырокопчёные	1,1 – 1,3

Вязку батонов шпагатом применяют для увеличения их жёсткости. При этом характер вязки зависит, прежде всего, от диаметра батона, а схема вязки

служит отличительным признаком вида и сорта колбасы. В отличие от колбас сосиски разделяют на батончики длиной 10...15 см [57,61,66].

В процессе шприцовки вместе с фаршем в оболочку попадает воздух, что способствует скоплению бульона во время варки и снижает качество готовой продукции. Удаление воздуха достигается прокалыванием специально предназначенной для этой цели вилкой. При неаккуратном накалывании можно местами нарушить целостность оболочки, что приводит к ухудшению качества готового продукта.

Нашприцованные колбасы немедленно навешивают на палки, которые размещают на рамах в 4 – 5 ярусов так, чтобы они не соприкасались между собой для дальнейшей термической обработки и сушки [57,61,66].

Заключительным этапом производства колбасных изделий является термическая обработка, включающая процессы осадки, варки, охлаждения и ряда других операций. Для достижения продуктом кулинарной готовности проводят термическую обработку [61,66]. Охлаждённый продукт направляют на упаковывание, маркирование, транспортирование и хранение.



Рис.1.14 – Классификация шприцевателей колбасного фарша

Анализ существующих способов и технических средств для шприцевания фарша позволил сформулировать основные классификационные признаки подоб-

ных устройств (рис.1.14): режим работы, род используемой энергии, вид движения рабочего органа и др. [31,57,61,66,68,192].

Табл.1.12 – Технические характеристики шприцевателей колбасного фарша

Наименование вы- теснителя	Производительность, кг/ч	Установленная мощность, кВт	Масса, кг	Стоимость, тыс. руб.
Е8-ФНА-01	1000	6	1080	240
ШВ-1	1000	3,55	214	140
U-159(идеал)	1200	2,2	574	160
Электромагнитный привод с ЛЭМД	1000	2	200	60

Структурная схема (рис.1.15,а) включает: силовой поршень, осуществляющий перемещение рабочего органа за счет энергии жидкости под давлением. Для такого типа устройств обязательным является наличие дополнительного оборудования, например, гидромотора, масляного насоса, маслопровода, манометра и др., что значительно повышает требования к обслуживанию и надежности отдельных элементов привода [31,57,68], технические характеристики шприцевателей колбасного фарша представлены в табл.1.12.

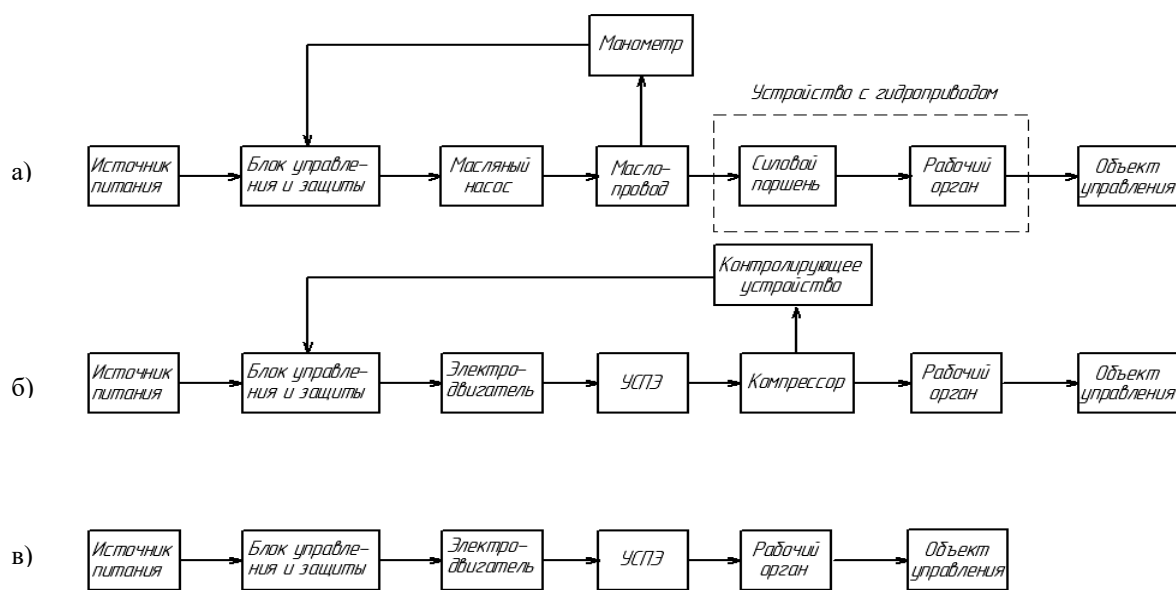


Рис.1.15 – Структурные схемы приводов шприцевателей колбасного фарша: а – с гидроприводом; б – с пневмоприводом; в – с электродвигателем вращательного действия.

Применение оборудования с пневмоприводом (рис.1.15,б) предполагает наличие пневмосети или передвижного компрессора, что влияет на предпочтительность применения подобных устройств в небольших фермерских хозяйствах

и колбасных цехах, а применение устройств согласования и передачи энергии (УСПЭ) снижает надежность.

Применение электрических двигателей вращательного движения в приводе оборудования с линейным перемещением исполнительного органа (рис.1.15,в) имеет большую материалоемкость.

Целесообразным для производства колбасной продукции является использование силового электрического привода, имеющего в основе, например, линейный электромагнитный двигатель, и обеспечивающий непосредственное преобразование электрической энергии в механическую с возвратно-поступательным движением исполнительного (рабочего) органа (рис.1.16) [182,192,194].

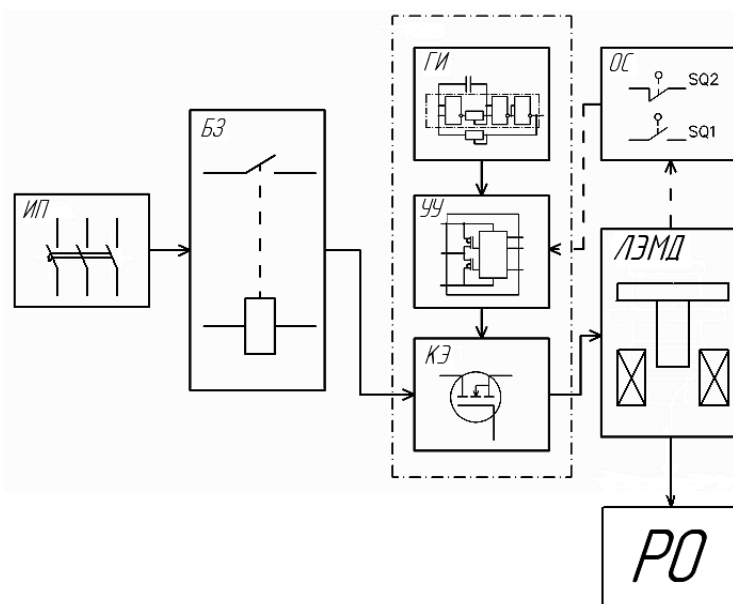


Рис.1.16 – Функциональная схема ЛЭМД-привода шприцевателя колбасного фарша: ИП – источник питания; БЗ – блок защиты; ГИ – генератор импульсов; УУ – устройство управления; КЭ – коммутационный элемент; ОС – обратная связь; ЛЭМД – линейный электромагнитный двигатель; РО – рабочий (исполнительный) орган.

Режим последовательных плавных срабатываний ЛЭМД обеспечивается устройством управления (УУ), осуществляющим периодическое включение коммутационного элемента (КЭ) и формирующим в обмотке двигателя силовые импульсы тока с требуемыми параметрами от источника питания (ИП). Для защиты от аварийных режимов работы используется блок защиты (БЗ).

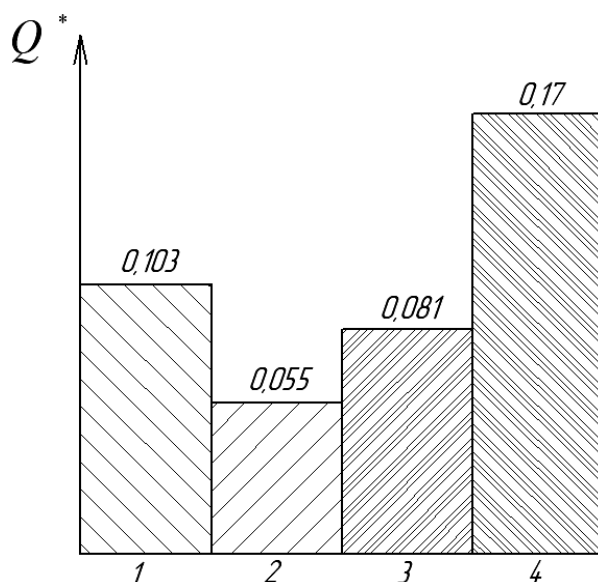


Рис.1.17 – Сравнительные характеристики шприцевателей колбасного фарша: 1 – пневматические; 2 – гидравлические; 3 – с электроприводом вращательного действия; 4 – с ЛЭМД.

Сравнительный анализ шприцевателей колбасного фарша целесообразно провести по относительному значению $Q^* = P / m$, где P – производительность оборудования, m – масса оборудования и представить в виде гистограммы (рис.1.17).

По предварительной оценке, использование ЛЭМД в приводе шприцевателей колбасного фарша позволит снизить материалоемкость в 1,7 раза по сравнению с пневматическими устройствами и в 3 раза по сравнению с гидравлическими [182,192,194].

ЛЭМД-привод устройств упаковывания продукции. Важной и распространенной операцией на заключительном этапе производства сельхозпродукции является наложение металлических скоб на упаковку – клипсование [31,57,68]. Для осуществления этой операции применяются специальные технические средства – клипсаторы, скрепляющие специальными скрепками оболочку, например, колбасных изделий.

Требования к техническим средствам для клипсования колбасных изделий перечислены в [61,66]. Во избежание выпуска некачественной продукции при клипсовании следует также учитывать:

- 1) периодичность технического обслуживания и изношенность оборудования;

- 2) квалификацию обслуживающего персонала;
- 3) типы клипсуемой оболочки (полиамидные, фиброузные, белковые, натуральные);
- 4) диаметр клипсуемой оболочки;
- 5) тип используемой клипсы;
- 6) рабочее давление клипсатора;
- 7) процент перенабивки оболочки;
- 8) состав и структуру фарша.

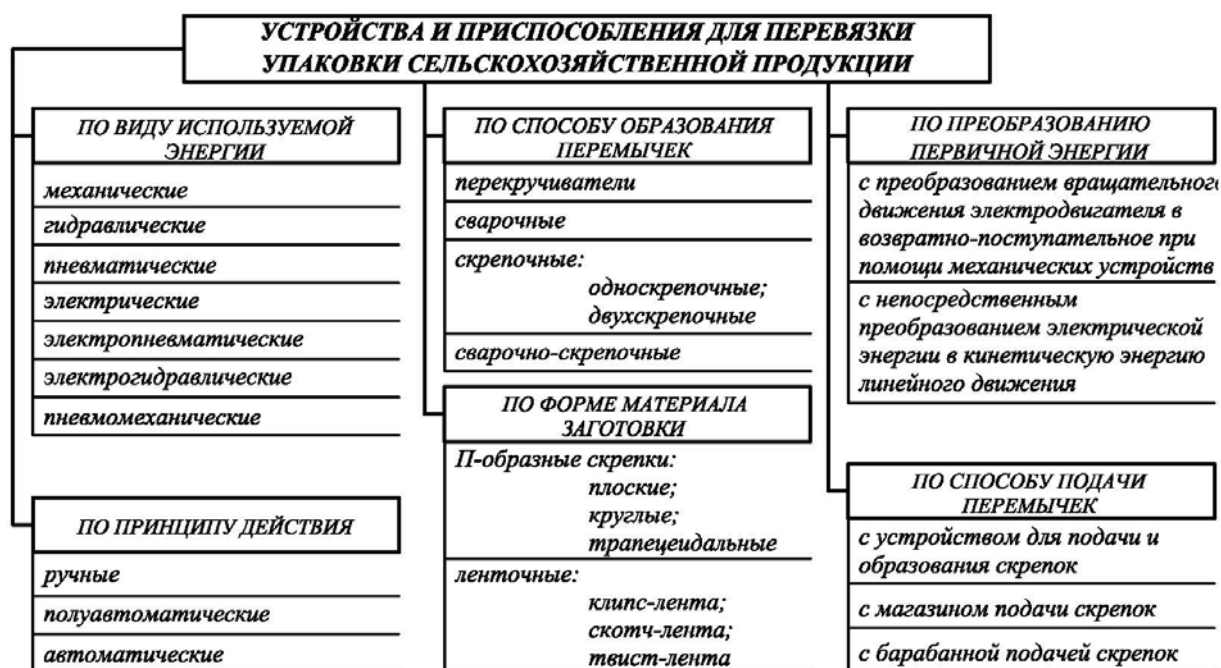


Рис.1.18 – Классификация устройств и приспособлений для перевязки упаковки сельскохозяйственной продукции

В работах [22,31,57,61,68] показано многообразие устройств и приспособлений для вязки, в частности, колбасных оболочек. Для примера на рис.1.18 показана классификационная схема таких технических средств.

К пневматическим и гидравлическим устройствам и приспособлениям для клипсования колбасных изделий относятся клипсаторы КПУ-1, КН-23М, КПО и др., технические характеристики которых представлены в таблице 1.13 [31,57,68].

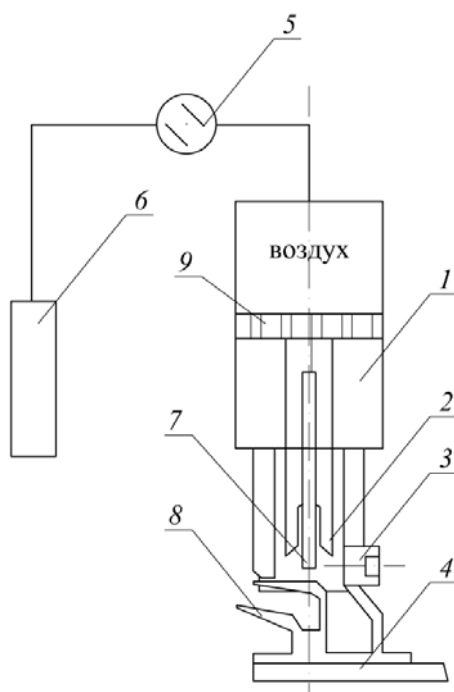


Рис.1.19 – Клипсатор периодического действия с пневмоприводом: 1 – цилиндр; 2 – режущий механизм; 3 – система подачи проволоки; 4 – станина; 5 – кран управления; 6 – ресивер; 7 – механизм формирования скрепки; 8 – матричная площадка.

Пневматические клипсаторы периодического действия (рис.1.19) имеют воздушный цилиндр 1 с поршнем 9 и станиной 4. Поршень сочленен с режущим и формирующим скрепку механизмом 7. Воздух в воздушную полость цилиндра подается по пневмопроводу от компрессора через ресивер 6 на кран 5, который управляет работой ресивера 5. На матричную площадку 8 подается наполненный фаршем колбасный рукав, поворачивается распределительный кран 5, и в подпоршневое пространство попадает воздух. Поршень 9 опускается вниз, и режущим механизмом 2 отрезает заготовку из проволоки, подаваемой из системы 3, и формирует скрепку толкателем 7, который при соприкосновении с матрицей огибает и скрепляет открытые концы оболочки и тем самым формирует колбасный батон.

Табл.1.13 – Технические характеристики пневматических клипсаторов

Параметры	КН-3С	КН-23М	КПО
Диаметр клипсуемой оболочки, мм ²	40 – 80	40 – 80	30 – 70
Время наложения скрепки, с	1,5	1,5 – 2	1,5 – 2
Давление воздуха в сети, МПа	0,4 – 0,5	0,4	0,5
Расход воздуха, л/цикл	0,8	1	1
Масса, кг	11	41,5	13

В малых мясоперерабатывающих предприятиях и фермерских хозяйствах применение пневматических устройств клипсования колбасных батонов представляется затруднительным ввиду значительной стоимости, сложности в обслуживании и ремонте. Для них характерно многоступенчатое преобразование энергии, наличие пневмосети или компрессора, дополнительное оборудование, а также большие габариты [21,57,68]. Структурная схема системы с пневмоприводом представлена на рис.1.20.

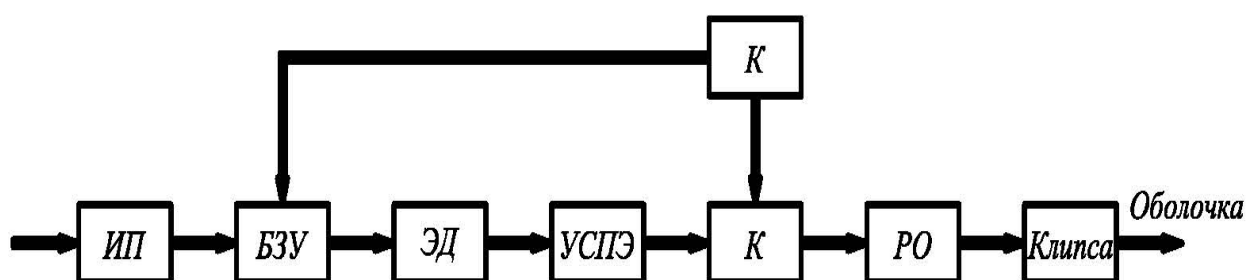


Рис.1.20 – Структурная схема оборудования для вязки колбасных батонов с пневмоприводом;
ИП – источник питания, БЗУ – блок защиты и управления, ЭД – электродвигатель, УСПЭ – устройство согласования и передачи энергии, К – компрессор, КУ – контролирующее устройство, РО – рабочий орган

На рис.1.21 приведены сравнительные гистограммы удельной производительности $Q^* = \frac{t}{m}$ пневматических клипсаторов – времени наложения скрепки за цикл t , отнесённой к единице массы оборудования m .

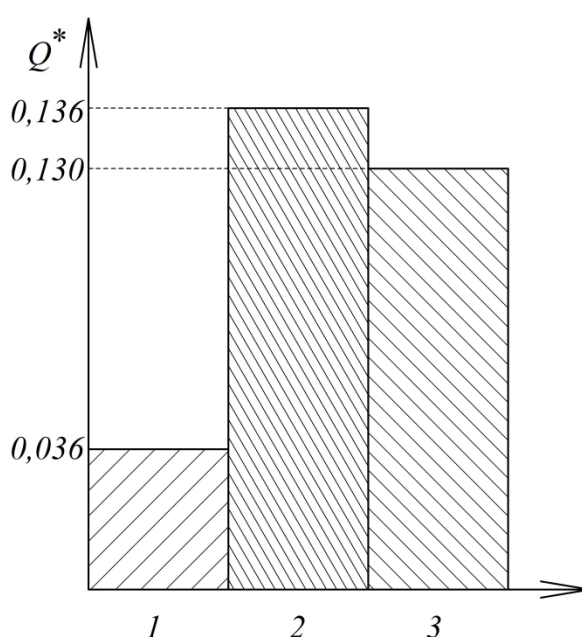


Рис.1.21 – Удельная производительность пневматических клипсаторов:
1 – КН-23М; 2 – КПО; 3 – КН-3С.

На рис.1.23 приведены сравнительные гистограммы удельной производительности $Q^* = t/m$ ручных клипсаторов.

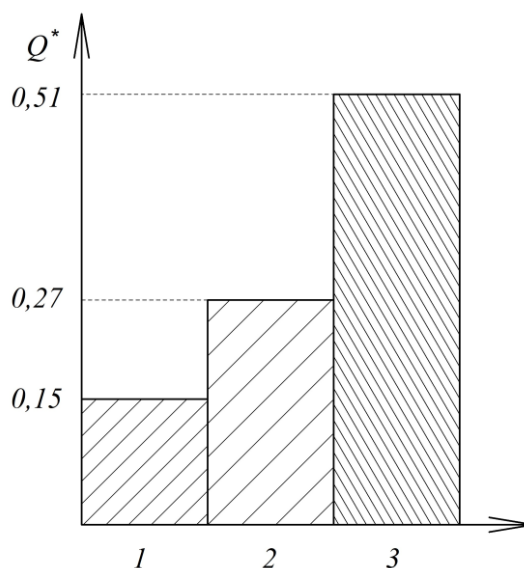


Рис.1.23 – Удельная производительность ручных клипсаторов:
1 – SHDK 50; 2 – КР-2; 3 – КН-8р.

Комбинированные устройства и приспособления для клипсования колбасных изделий. Широкое применение в мясоперерабатывающей промышленности получили клипсаторы комбинированные – полуавтоматы, технические характеристики которых представлены в табл.1.15 [31,57,68]. К ним относятся клипсаторы КДН, КО, КОРУНД-КЛИП 1-2,5.

Табл.1.15 – Технические характеристики полуавтоматических комбинированных клипсаторов

Параметры	КДН	КО	КОРУНД-КЛИП 1-2,5
Диаметр клипсуемой оболочки, мм ²	30-120	30 – 110	30 –120
Время наложения скрепок, сек/ цикл	1	2 –4	1.5
Давление воздуха в сети, МПа	0,6-0,8	0,6 – 0,7	0,4
Расход воздуха, л/цикл	0,8	1,5	1
Габаритные размеры, м	0,7x0,7x0,8	0,2 x0,35x0,9	0,3x0,2x0,845
Масса, кг	10	6	11

Данный вид клипсаторов может агрегатироваться со шприцами любой марки. В процессе работы клипсатор-полуавтомат управляет шприцем. Он дозирует величину колбасного батона, имеет устройство регулировки плотности набивки оболочки. Подвижный питатель позволяет создать запас оболочки для наполнения (до 40 м) и разгрузить оболочку от излишнего напряжения при смещении ее пережимом.

Клипсаторы работают на полиамидных, целлофановых и предназначенных для механического клипсования белковых оболочках диаметром от 0,04 до 0,08 м. Раздельный регулятор величины зажима скрепок позволяет обеспечить оптимальный режим наложения скрепок на различные сорта оболочек. Величина батона может дозироваться как самим клипсатором, так и использоваться функция дозирования шприца (если она имеется).

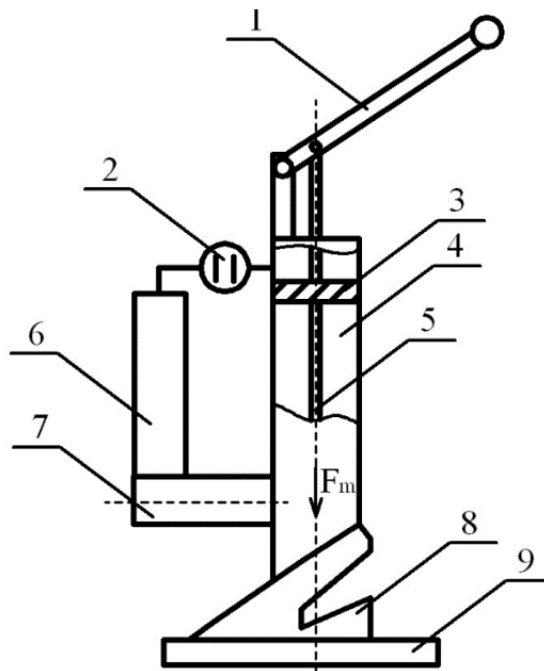


Рис.1.24 – Клипсатор комбинированный полуавтоматический: 1 – рычаг; 2 – электромагнитный клапан управления; 3 – поршень; 4 – цилиндр; 5 – пуансон; 6 – ресивер; 7 – магазин подачи скрепок; 8 – матрица; 9 – опорная площадка.

Клипсаторы комбинированного действия (рис.1.24) в своей конструкции имеют, воздушный цилиндр 4 с поршнем 3 и рычажный механизм 1. В момент усилия на рычаг 1 подается сигнал на открытие электромагнитного клапана 2. От компрессора через ресивер 6 начинает поступать воздух в воздушную полость цилиндра 4. Поршень 3 опускается вниз и за каждый ход пуансона 5 на предварительно заложенную колбасную оболочку с фаршем в выпускное отверстие подается одна скоба из системы магазина скрепок 7 и формирует скребку механизмом-толкателем 5, который при соприкосновении с матрицей огибает и скрепляет открытые концы оболочки и тем самым формирует колбасный батон.

Недостатком подобных устройств является наличие прецизионных узлов, дополнительное оборудование, сравнительно большие габариты, высокая квалификация обслуживающего персонала.

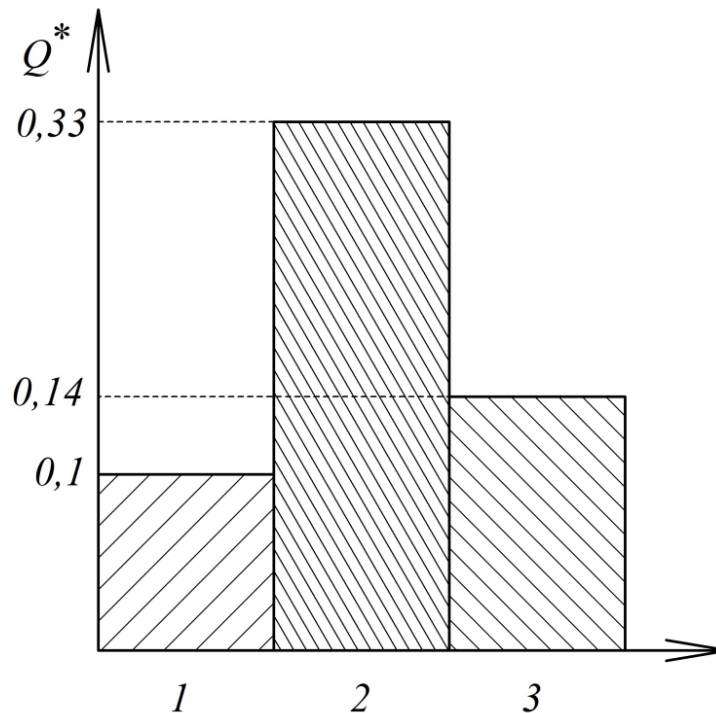


Рис.1.25 – Удельная производительность комбинированных полуавтоматических клипсаторов: 1 – КДН; 2 – КО; 3 – КОРУНД-КЛИП 1-2,5.

На рис.1.25 приведены сравнительные гистограммы удельной производительности $Q^* = t/m$ комбинированных полуавтоматических клипсаторов.

Перспективы применения линейных электромагнитных двигателей в приводе устройств для клипсования. Перспективным направлением в разработке устройств для клипсования оболочек, например, колбасных батонов, отвечающих современным требованиям, является использование привода с линейным электромагнитным двигателем, отличающегося относительно малым энергопотреблением, сравнительно высокими удельными выходными показателями, и обеспечивающего непосредственное преобразование электрической энергии в механическую работу с линейной траекторией движения рабочего органа – пуансона [182,219]. Обобщенная структурная схема такого привода представлена на рис.1.26.

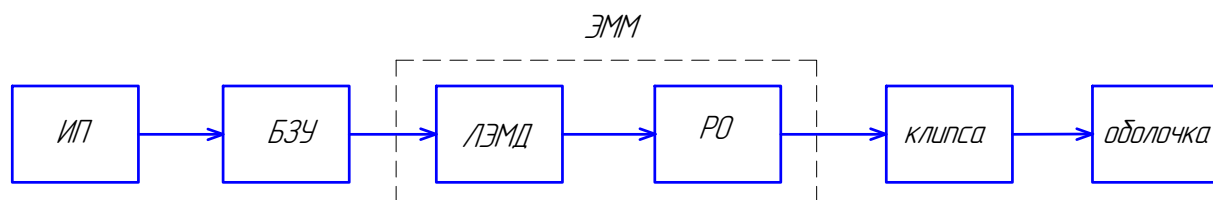


Рис.1.26 – Структурная схема ЛЭМД-привода устройств для клипсования: ИП – источник питания, БЗУ – блок защиты и управления, РО – рабочий (исполнительный) орган, ЭММ – электромагнитная машина.

Сопоставление и анализ технических характеристик известных устройств и предлагаемого безударного ЛЭМД-привода целесообразно представить в виде табл.1.16 и сравнительных гистограмм (рис.1.27).

Табл.1.16 – Технические характеристики устройств для клипсования

Тип клипсатора	Производительность, клипс/мин	Масса, кг	Стоимость, тыс. руб.
КПО	60	13	50
408-PL	30	32	48
КН-23М	60	41,5	123
Корунд-клип 2-2,5М	45	22	53
АС 009	180	120	165
ЛЭМД-привод	60	9	18

Основными удельными показателями примем отношения производительности оборудования к его массе Q_1^* (рис.1.27,а) и к его стоимости Q_2^* (рис.1.27,б).

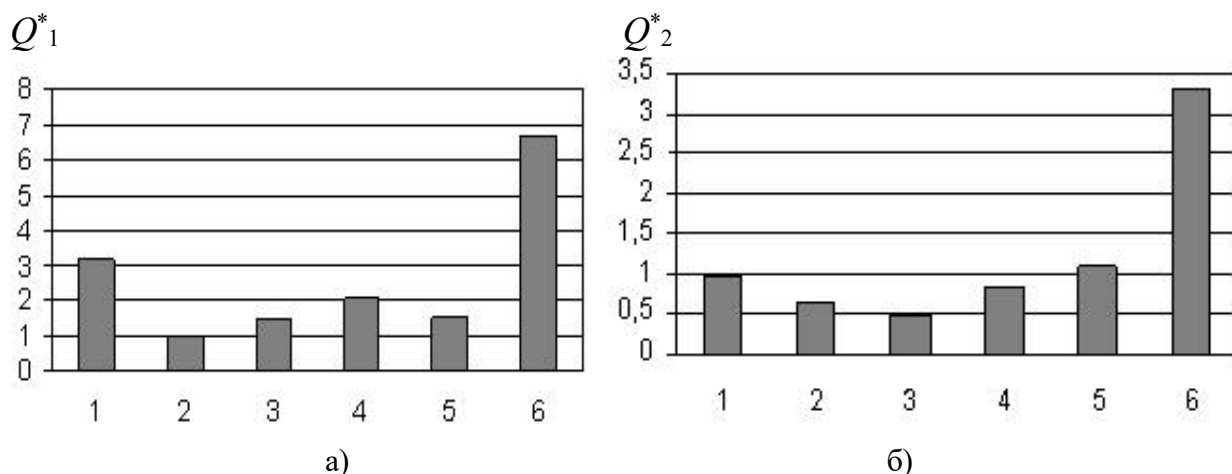


Рис.1.27 – Сравнительные гистограммы устройств для клипсования: 1 – КПО; 2 – 408-PL; 3 – КН-23М; 4 – Корунд-клип 2-2,5М; 5 – АС 009; 6 – ЛЭМД-привод

Таким образом предварительно установлено, что применение устройств для клипсования с безударными ЛЭМД-приводами позволит снизить материалоемкость в 2...6 раз, затраты на оборудование в 3...6 раз [182,219].

1.2 Обобщенная структурная схема ЛЭМД-привода для технологий АПК

К настоящему времени в области создания, совершенствования и практического использования ударных и безударных машин с линейными электромагнитными двигателями определились четыре характерные группы, классифицированные по назначению, выполняемым технологическим операциям, выходным энергетическим показателям и КПД.

Представляется, что несмотря на достигнутые успехи в решении наиболее существенных задач по исследованию, разработке и практическому использованию импульсных машин и линейных электромагнитных приводов различного технологического назначения, многие из них до сих пор нельзя признать полностью исчерпанными или однозначными, поскольку стремление добиться максимальных выходных показателей за счет наиболее полного преобразования энергии в механическую работу в простых, дешевых и технологичных в изготовлении ЛЭМД заставляет всякий раз обращаться к их анализу при создании новых или совершенствовании существующих практических конструкций импульсных электромагнитных машин.

Обобщенная структурная схема (рис.1.28), на которой представлена вся совокупность взаимодействующих функциональных элементов, помогает оценить достигнутый уровень и определить наиболее важные задачи по созданию и дальнейшему совершенствованию как собственно машин с электромагнитными двигателями, так и систем с их использованием на предприятиях и в технологиях АПК [83,105,124,195,196,230].

Обобщенная структурная схема ЛЭМД-привода представляется силовым и информационным каналами. Источник питания и преобразователи энергии – электрический, электромеханический и механический – образуют силовой канал; устройства управления преобразуемой энергией составляют информационный канал.

Двунаправленные стрелки отражают возможность передачи энергии между структурными элементами, в общем случае, в любом направлении.

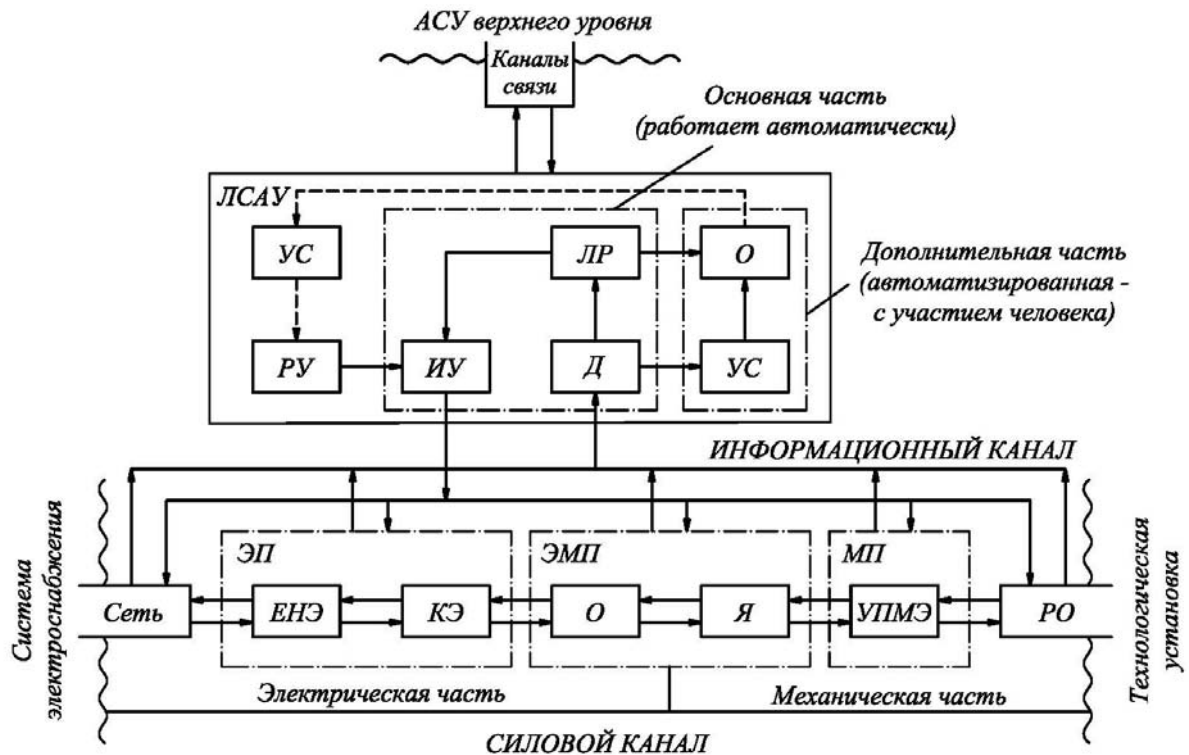


Рис.1.28 – Обобщенная структурная схема ЛЭМД-привода: ЭП – электрический преобразователь; ЭМП – электромеханический преобразователь; МП – механический преобразователь; ЕНЭ – емкостной накопитель энергии; КЭ – коммутационный элемент; О – обмотка двигателя; Я – якорь; УПМЭ – устройство передачи механической энергии; РО – рабочий орган; ЛСАУ – локальная система автоматического управления; Д – датчик; УС – устройство связи и сопряжения; О – оператор; ЛР – локальный регулятор; РУ – ручное управление; ИУ – исполнительное устройство; АСУ – автоматизированная система управления.

Роль и значение показанных на структурной схеме функциональных блоков представляются следующим образом.

Импульсная машина с электромеханическим преобразователем ЭМП осуществляет в ЛЭМД-приводе главную энергетическую функцию системы – преобразует электрическую энергию источника в механическую энергию подвижной части (якоря *Я*) и обеспечивает необходимые характеристики движения. При этом, электромагнитомеханическим преобразователям свойственны двухступенчатые энергопреобразовательные циклы, в которых на первом этапе поступающая в обмотку *О* электрическая энергия источника частично превращается в энергию магнитного поля и аккумулируется в магнитной системе, создавая возрастающую пондеромоторную силу, которая и обеспечивает перемещение и механическую мощность подвиж-

ной части ЭМП на втором этапе цикла. Так как в ЭМП она определяется совокупностью сил сопротивления движению якоря и электромагнитной силы, то, меняя соотношение этих составляющих, можно влиять на характеристики движения якоря $Я$.

Относительная независимость слагаемых и двухстадийное энергопреобразование в ЭМП позволяют выделить электрический канал управления подвижной частью преобразователя: по цепи обмотки O за счет модулирования питающих электрических импульсов мощности. Как правило, действие этого канала сопровождает обе стадии энергопреобразования ЭМП. Электрический канал является независимым, основным каналом, без которого функционирование ЭМП невозможно.

Подвижная часть электромеханического преобразователя – якорь $Я$ – совершает ограниченные возвратно-поступательные движения по линейной траектории. При этом, рабочее или возвратное движение может обеспечиваться, в общем случае, как за счет действия электромагнитных сил, так и за счет использования упругих накопительных элементов (например, пружин). Формируемые импульсы механической силы (мощности) передаются технологической установке. В одних ЛЭМД-приводах передача обеспечивается непосредственным воздействием якоря на объект, в других могут использоваться специальные элементы для вывода и передачи силовых импульсов УПМЭ.

Особенности и свойства УПМЭ определяются назначением ЛЭМД-привода. Так, в электромагнитных транспортерах якорь воздействует на штангу (трос) не непосредственно, а через зажимной механизм, передающий механическую энергию штанге через ее боковую поверхность. Оснащение электромагнитомеханических преобразователей подобными устройствами представляется важным, поскольку нередко позволяет преодолеть сдерживающий эффективное применение ЭМП их характерный недостаток, определяемый ограниченным ходом якоря, и расширить, таким образом, области использования ЛЭМД-привода.

Устройство питания и управления – электрический преобразователь (ЭП) обеспечивает дискретизацию непрерывного потока мощности от источника тока к ЭМП и формирует необходимые для нормальной работы электромагнитной машины

униполярные питающие импульсы напряжения и тока с необходимыми параметрами.

Основным функциональным элементом ЭП выступает полупроводниковый (тиристорный или транзисторный) коммутационный элемент КЭ, который в соответствии с сигналами управляющего устройства обеспечивает импульсную коммутацию обмотки О электромеханического преобразователя и источника. В автономных, тем более, переносных ЛЭМД-приводах мощности ИТ и нагрузки соизмеримы. И хотя источник, в частности, аккумуляторный, допускает непосредственное подключение ЭМП для формирования питающих импульсов в обмотке О, повышенная нагрузка на батареи негативно влияет на их показатели и снижает ресурс.

Применение в системе питания промежуточного накопителя энергии ЕНЭ, например, емкостного типа, обеспечивает преобразование импульсной нагрузки ЭМП в стационарную источника питания и повышает эффективность рабочего процесса. Как правило, накопитель выполняется моноблочным, однако в отдельных случаях представляется целесообразным секционирование батареи ЕНЭ.

Электрические сети переменного тока общего назначения, по которым передается и распределяется около 98% всей вырабатываемой электроэнергии способны и позволяют питать импульсные электромагнитные машины, например, стационарного исполнения, подключаемые именно к распределительным сетям переменного тока общего назначения напряжением до 1 кВ. Взаимодействие импульсных ЛЭМД с такими источниками неограниченной мощности, их влияние на выходные показатели электромагнитных машин достаточно хорошо изучено.

Для согласования выходных характеристик двигателя и параметров нагрузки необходимым является разработка локальных систем автоматического управления ЛСАУ (рис.1.28), целью которых является регулирование работы ЛЭМД-привода с минимальной ошибкой и максимальной скоростью для увеличения эффективности выполнения заданной функции.

В классическую систему ЛСАУ включаются, в частности локальный регулятор ЛР, исполнительное устройство ИУ, датчик Д и др. Пунктирными стрелками

показан путь, который позволяет оператору О через устройства связи и сопряжения УС (Ethernet, интерфейс RS-485 и др.) и неавтоматического воздействия РУ на ИУ непосредственно.

Управляющими функциями ЛСАУ с ЛЭМД-приводами, в частности являются регулирование отдельных технологических параметров, однократное логическое управление операциями и процессами, программное логическое и адаптивное управление и др.

1.3 Выводы по первой главе

Оценены преимущества, показана конкурентность применения ЛЭМД-приводов на предприятиях АПК, основанная на снижении: затрат на оборудование в 3...6 раз; энергопотребления для ударных и безударных операций, процессов и технологий – в 2...3 раза; материалоемкости приводов и машин – в 1,7...3 раза по сравнению с пневматическими и гидравлическими системами сходного назначения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ И СНИЖЕНИЯ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛЭМД-ПРИВОДОВ

2.1 Магнитные системы линейных электромагнитных двигателей

При обосновании конструкции ЛЭМД для привода машин того или иного назначения следует принять предпочтительную магнитную систему, существенно влияющую на характеристики двигателя. Полученные результаты [12,60,89,95,105,107,110,111,130,131,135,136,149,167] показывают, что предпочтительным для ударных и безударных ЛЭМД-приводов выступает двухзазорный линейный электромагнитный двигатель цилиндрической структуры, у которого необходимые энергетические характеристики, простая и технологичная конструкция.

Необходимость достижения конкурентности ЛЭМД при совершенствовании приводов рабочих машин требует повышения их энергетических характеристик и предполагает, в том числе, оптимизацию свойств основных систем двигателя, в частности, магнитной, за счет выбора совокупности геометрических показателей и установления наилучших соотношений размеров элементов конструкции двигателя. Приведем краткую оценку характерных магнитных систем с притягивающимся, втягивающимся комбинированным якорем цилиндрических ЛЭМД для ударных и неударных машин и устройств из анализа опубликованных работ [2,9,105,130,135,136,149,167].

Сила тяги ЛЭМД с притягивающимся якорем [105,149,166,167] создается магнитными потоками рабочего зазора и выпучивания. При этом выходные характеристики двигателя малоконкурентны [196,230]. Недостатки и особенности ЛЭМД втяжного типа подробно представлены в [102,149,167].

Наилучшими удельными силовыми и энергетическими показателями из представленных магнитных систем обладают цилиндрические ЛЭМД с комбинированным якорем [102,167].

При выявлении их потенциальных возможностей в [109,149,165,237] были сопоставлены результаты экспериментальных исследований статических тяговых характеристик $F_m=f(\delta)$, при $i=const$, для магнитных систем броневых ЛЭМД цилиндрической структуры.

Было показано, что лучшими показателями обладает и является предпочтительной, например, для ЛЭМД-приводов безударных машин, магнитная система со стопом и комбинированным якорем, превосходящая до 4 раз сходные по структуре цилиндрические системы [105,149].

Сравнения магнитных систем ЛЭМД по интегральной работе A_u по методике, предложенной в [149], показали, что наибольшее значение A_u обеспечивает ЛЭМД со стопом, превосходящий этот показатель для ЛЭМД с притягивающим якорем в 2,5...3 раза. Результаты исследования и практического применения машин, станков, инструментов, ЛЭМД-привод которых оснащен такими магнитными системами, подробно представлены в работах [105,130,149,167].

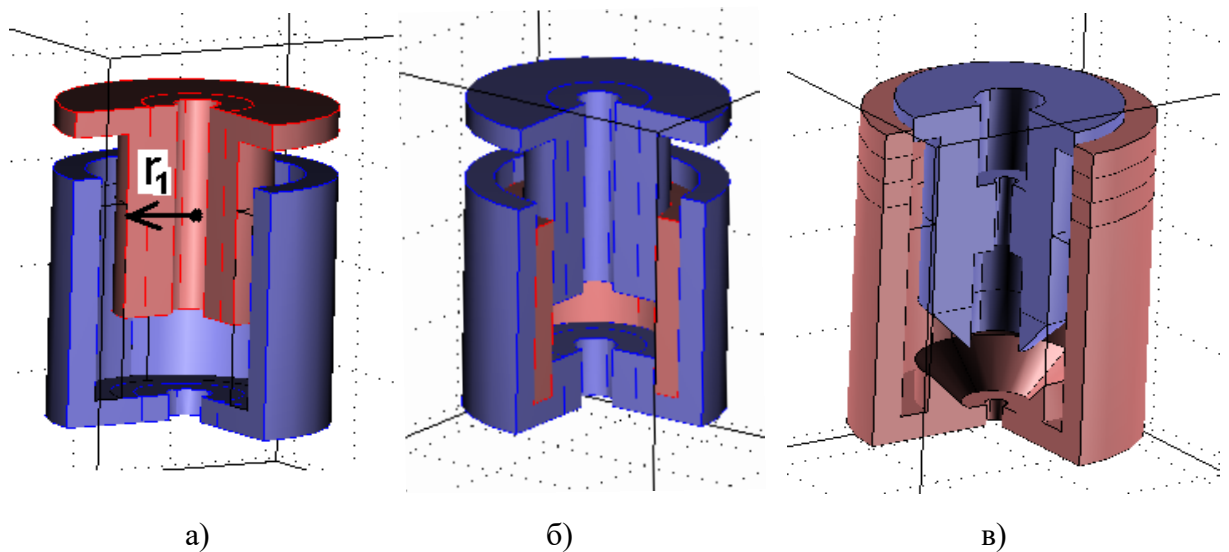


Рис.2.1 – Магнитные системы ЛЭМД цилиндрической структуры и комбинированным якорем; а – без стопа; б – со стопом, в – с конусной рабочей поверхностью.

Вместе с тем, для расширения функциональных возможностей ЛЭМД-приводов, например, для создания транспортеров, сокоотжимающих машин или машин для погружения длинных продольно-неустойчивых стержней в грунт, представляется необходимым оснастить двигатель сквозным осевым каналом (рис.2.1) [83,124,195,230].

Цилиндрические соосные отверстия в главных элементах магнитной системы – якоре, стопе, ярме, корпусе, – определяют существенные отличия традиционных и ЛЭМД со сквозным осевым каналом, поскольку дополнительные воздушные зазоры на пути магнитных потоков в двигателе изменяют магнитные свойства системы и неизбежно ухудшают характеристики таких ЛЭМД в сравнении с двигателями со сплошными ферромагнитными деталями [34,149,167].

Геометрические показатели, в том числе поперечное сечение канала определяется типом, формой помещаемого в канал и обладающего собственными магнитными свойствами инструмента и влияет на магнитную проницаемость и характеристики двигателя и ЛЭМД-привода машины.

Из опубликованных работ [119,120,124,127,203,204], следует, что, хотя такие ЛЭМД-приводы были заявлены и сформулированы некоторые рекомендации по выбору отдельных параметров, однако углубленные исследования влияния характеристик осевого канала на показатели и рабочие процессы ЛЭМД-приводов не проводились. Таким образом, представляется необходимым выявить допустимые, с точки зрения ухудшения выходных характеристик ЛЭМД, диапазоны варьирования поперечного сечения осевого канала относительно базисного размера r_1 втяжной части якоря (рис.2.1,а). Воспользуемся методами имитационного моделирования, основанными на использовании специализированного программного обеспечения *COMSOL Multiphysics 4.3b* [142], *Matlab*, *Simulink* [58,260].

2.2 Моделирование процессов энергопреобразования в магнитных системах ЛЭМД со сквозным осевым каналом

Для оценки влияния размера осевого канала на выходные характеристики ЛЭМД ударных и безударных машин целесообразно провести математическое моделирование распределения магнитного поля в пространстве изучаемых конструкций магнитных систем и динамики процесса электро-механического преобразования энергии в них.

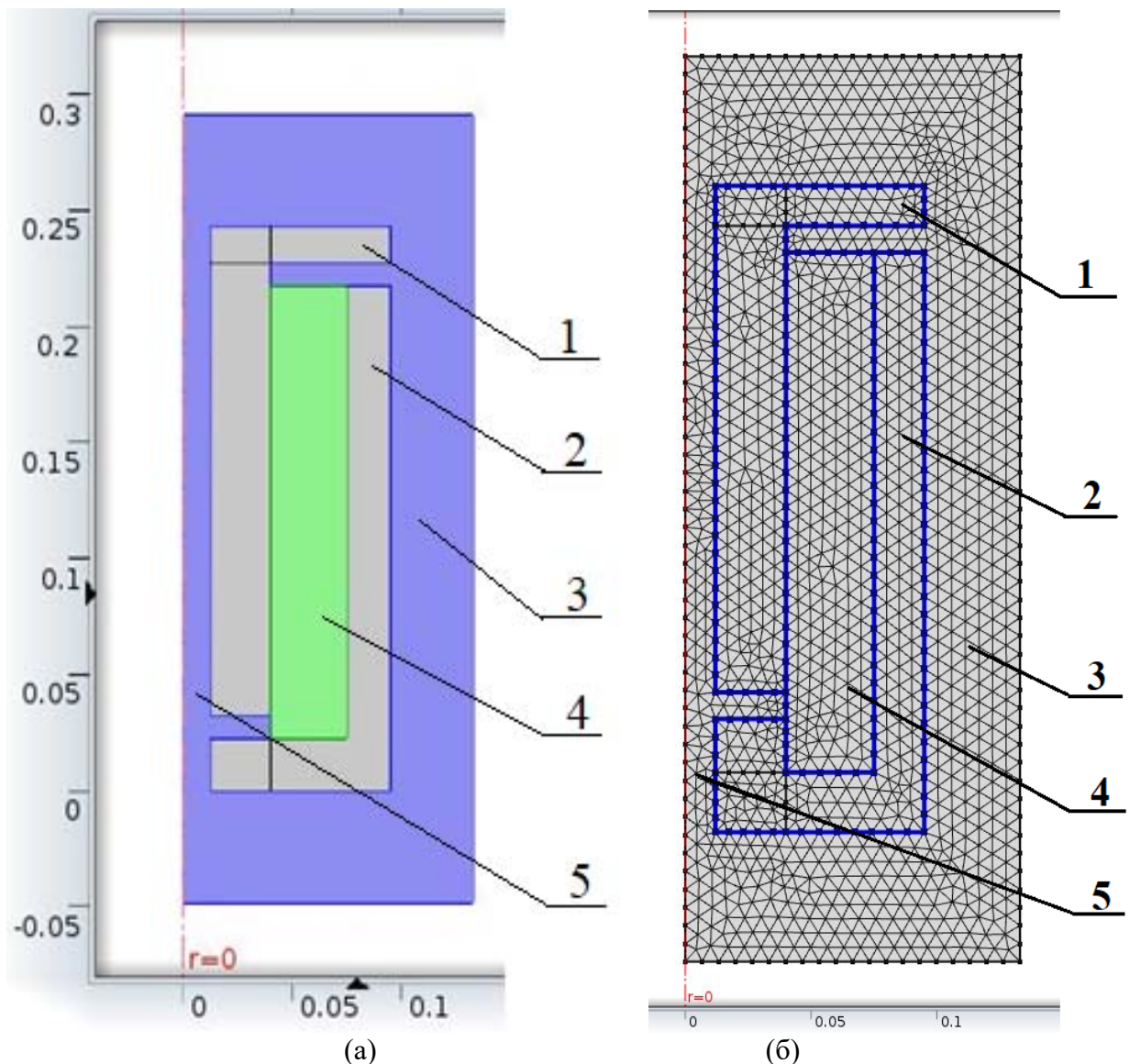


Рис.2.2 – Расчетная область осесимметричной модели магнитной системы ЛЭМД с осевым каналом (а) и пример разделения расчетной области на конечные элементы (б): 1 – комбинированный якорь, 2 – статор, 3 – воздух, 4 – обмотка, 5 – осевой канал

Математическая модель характеризуется комплексным, взаимосвязанным характером моделирования процессов, протекающих при работе ЛЭМД, в основе которой положены общепринятые положения теории электро-меха-

нического преобразования энергии [59,102,107,108,173]. Модель включает в себя последовательные расчеты следующих полей и процессов:

- расчет распределения индукции магнитного поля в магнитопроводе, рабочем зазоре ЛЭМД и окружающем пространстве;
- определение мгновенной величины собственной индуктивности обмотки возбуждения ЛЭМД в зависимости от величины рабочего воздушного зазора, тока в обмотке и относительного радиуса осевого канала;
- определение массы якоря ЛЭМД в зависимости от его геометрических показателей;
- расчет динамических характеристик тока $i=f(t)$ в обмотке ЛЭМД и перемещения $\delta=f(t)$ якоря;
- определение интегральных показателей ЛЭМД.

Реализация расчетов математической модели производилась с помощью специализированного программного обеспечения: COMSOL Multiphysics 4.3b [142], Matlab, Simulink [58,260]. Листинг программ на языке инженерных расчетов Matlab приведен в приложении 1.

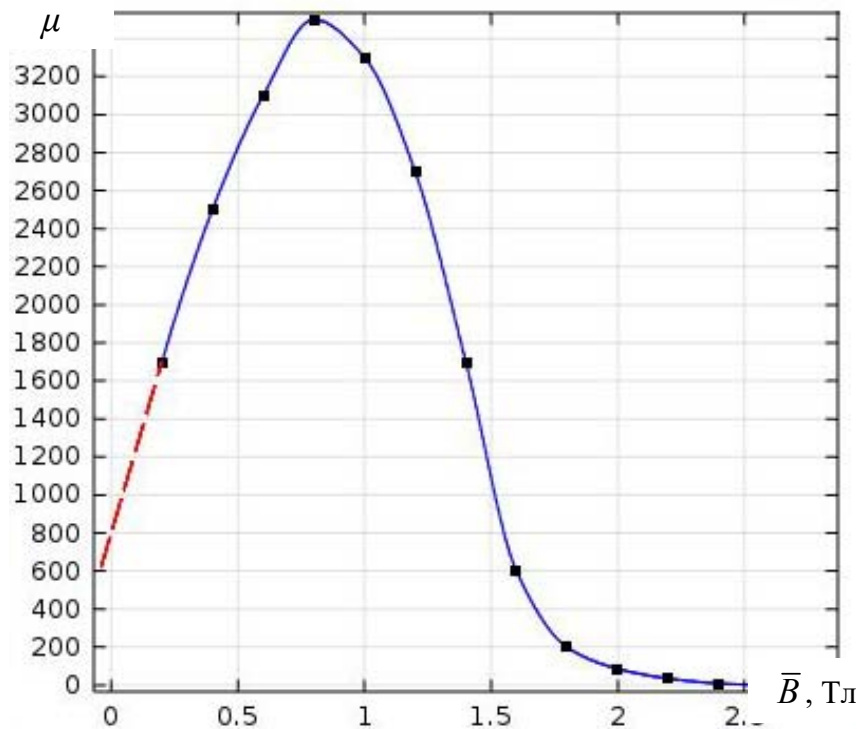


Рис.2.3 – Зависимость $\mu = f(|\bar{B}|)$ электротехнической стали магнитопровода ЛЭМД

На рис.2.2 показана расчетная область, представляющая собой правую половину осевого сечения осесимметричной конструкции магнитной системы ЛЭМД [142].

Магнитные свойства областей магнитопровода в ходе расчетов соответствовали характеристикам электротехнической стали Ст40. Зависимость относительной магнитной проницаемости этого материала от магнитной индукции представлена на рис.2.3 [42,258].

Моделирование динамических характеристик магнитных систем двигателей со сквозным осевым каналом предполагает определение следующих зависимостей:

$$i=f(t) \text{ и } \delta=f(t), \quad (2.1)$$

существенное влияние на которые оказывают как конструктивные, так и режимные параметры ЛЭМД [39,41,177], определяющими из которых являются:

- зависимость мгновенной собственной индуктивности L от тока i , рабочего воздушного зазора δ и относительного размера осевого канала r' ;
- зависимость массы $m_{\text{я}}$ якоря ЛЭМД от относительного размера осевого канала r' :

$$m_{\text{я}} = f(r'); \quad (2.2)$$

- зависимость сопротивления обмотки r от ее температуры θ :

$$r=f(\theta); \quad (2.3)$$

- тепловой режим ЛЭМД;
- напряжение u питания, подаваемое на обмотку ЛЭМД:

$$u=f(t); \quad (2.4)$$

- зависимость противодействующего усилия F_{np} упругого возвратного элемента от координаты, скорости и ускорения движения якоря:

$$F_{\text{np}} = f(t, \delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}). \quad (2.5)$$

Для расчета статического распределения магнитного поля воспользуемся выражением [40]

$$\nabla \times \left(\frac{\bar{B}}{\mu_0 \mu_r} \right) = \bar{j}_{cmp}, \quad (2.6)$$

где $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; μ_0 , μ_r – абсолютная магнитная проницаемость вакуума и относительная проницаемость материала в рассматриваемой точке поля; $\bar{j}_{cmp}$ – плотность сторонних токов.

Численные решения уравнения (2.6), осуществляемые с помощью программы COMSOL Multiphysics 4.3b [142], определяют значения в узлах сетки треугольных конечных элементов, на которые разделена расчетная область, затем величины аппроксимированы для других точек расчетной области в соответствии с алгоритмом расчета. Пример разбиения расчетной области на конечные элементы представлен на рис.2.2,б [195]. При изучении модели степень разбиения расчетной области на конечные элементы ограничивалась величиной оперативной памяти персональной ЭВМ и достигала нескольких сотен тысяч конечных элементов, обеспечивая заданную точность.

Последовательность действий в программе COMSOL Multiphysics задается с помощью скрипта на языке Matlab, выполнение которого позволяет получить значения функции собственной индуктивности обмотки ЛЭМД в зависимости от величины рабочего воздушного зазора δ , тока i в обмотке и относительного радиуса осевого канала $r' = \frac{r_{o.k.}}{r_1}$:

$$L = f(\delta, i, r'); \quad (2.7)$$

где $r_{o.k.}$ – радиус осевого канала; r_1 – радиус якоря; L – собственная индуктивность обмотки, $L = \frac{\psi}{i}$; ψ – потокосцепление обмотки; i – ток в обмотке ЛЭМД:

$$i = j_{cmp} S_{np} k_3, \quad (2.8)$$

где S_{np} – площадь поперечного сечения провода обмотки ЛЭМД; k_3 – коэффициент заполнения окна обмотки обмоточным проводом. Листинг данного скрипта представлен в приложении 1.

Табл.2.1 – Матрица индуктивностей $L = f(\delta, i)$ при $r' = const$

i, A	$\delta, мм$					
	δ_1	δ_2	δ_3	...	δ_{n-1}	δ_n
	$L, Гн$					
i_1	$L_{1\ 1}$	$L_{1\ 2}$	$L_{1\ 3}$	...	$L_{1\ n-1}$	$L_{1\ n}$
i_2	$L_{2\ 1}$	$L_{2\ 2}$	$L_{2\ 3}$	...	$L_{2\ n-1}$	$L_{2\ n}$
i_3	$L_{3\ 1}$	$L_{3\ 2}$	$L_{3\ 3}$	...	$L_{3\ n-1}$	$L_{3\ n}$
...	...	...	...	...	...	...
i_{m-1}	$L_{m-1\ 1}$	$L_{m-1\ 2}$	$L_{m-1\ 3}$	...	$L_{m-1\ n-1}$	$L_{m-1\ n}$
i_m	$L_{m\ 1}$	$L_{m\ 2}$	$L_{m\ 3}$	...	$L_{m\ n-1}$	$L_{m\ n}$

Табл.2.2 – Матрица индуктивностей $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,3$

$L, Гн$	$\delta, мм$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,463998	0,463998	0,301291	0,235256	0,198402	0,174722	0,157407	0,143895	0,133735	0,125031	0,117644
10	0,244026	0,244026	0,228218	0,210856	0,194115	0,177938	0,162663	0,149028	0,138391	0,129187	0,121354
20	0,137078	0,137078	0,134146	0,130359	0,1267	0,123222	0,119813	0,116381	0,11325	0,110019	0,106802
30	0,096481	0,096481	0,095484	0,093874	0,092295	0,090788	0,089287	0,087778	0,086423	0,085016	0,08363
40	0,075219	0,075219	0,074706	0,073784	0,072842	0,072007	0,071103	0,070223	0,069425	0,068583	0,067745
50	0,06208	0,06208	0,061798	0,061183	0,060547	0,059998	0,059383	0,058748	0,058245	0,057664	0,057067
60	0,05322	0,05322	0,053024	0,052571	0,052129	0,051703	0,051272	0,05083	0,050395	0,049985	0,049537
70	0,046774	0,046774	0,046634	0,046267	0,045929	0,045604	0,045296	0,044936	0,044611	0,044278	0,043941
80	0,041871	0,041871	0,04178	0,041483	0,041239	0,040971	0,040684	0,040419	0,040151	0,039888	0,039615
90	0,037998	0,037998	0,037936	0,03771	0,037484	0,037271	0,03706	0,036832	0,036615	0,036392	0,036167
100	0,034969	0,034969	0,034831	0,034664	0,034463	0,034286	0,034107	0,033915	0,033735	0,033544	0,033353

Табл.2.3 – Матрица индуктивностей $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0$

$L, Гн$	$\delta, мм$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,482763	0,482763	0,308337	0,239321	0,201114	0,176569	0,158706	0,145235	0,134566	0,12568	0,118193
10	0,263886	0,263886	0,242933	0,222075	0,201437	0,181938	0,164515	0,150483	0,139176	0,129732	0,121779
20	0,148905	0,148905	0,144503	0,14005	0,135717	0,131532	0,127346	0,12333	0,119403	0,115446	0,111575
30	0,104783	0,104783	0,102989	0,101193	0,099353	0,097628	0,095865	0,094183	0,092541	0,090888	0,089243
40	0,081443	0,081443	0,080464	0,07949	0,078473	0,077475	0,07647	0,07549	0,074533	0,073592	0,072641
50	0,067087	0,067087	0,066466	0,065799	0,06514	0,064483	0,063792	0,063143	0,062513	0,061851	0,06121
60	0,057339	0,057339	0,05691	0,056404	0,055903	0,055457	0,05499	0,054513	0,054024	0,053557	0,053064
70	0,050292	0,050292	0,049964	0,049598	0,049231	0,048857	0,048503	0,048124	0,047766	0,047385	0,047008
80	0,044937	0,044937	0,044645	0,044354	0,044072	0,04379	0,043498	0,043222	0,042916	0,042619	0,042312
90	0,040704	0,040709	0,040471	0,040235	0,040004	0,039774	0,039537	0,039301	0,039061	0,038816	0,038563
100	0,037285	0,037285	0,037094	0,036897	0,036704	0,036513	0,036315	0,036119	0,035918	0,035713	0,035499

Потокоцепление ψ обмотки ЛЭМД:

$$\psi = 2 \cdot \pi w_r \sum_{j=1}^n \int B_z dr, \quad (2.9)$$

где w_r – количество слоев обмотки вдоль горизонтальной оси « r » (рис.2.2,а); n – число слоев обмотки вдоль вертикальной оси « z »; B_z – проекция вектора магнитной индукции на вертикальную ось « z ».

Значения индуктивности $L = f(\delta, i, r')$ программа COMSOL Multiphysics представляет в виде матрицы (табл.2.1) (Приложение 2). Пример матрицы индуктивностей для магнитных систем с осевым каналом ($r' = 0,3$) без осевого канала приведены соответственно в табл.2.2 и табл.2.3 [43].

Картины распределения магнитного поля для принятых конструкций магнитных систем ЛЭМД представлены на рис.2.4 и рис.2.5, а также в Приложении 3. На рисунках цветом выделены наиболее напряженные (красным цветом), по величине магнитной индукции, элементы магнитной системы. Сравнительный анализ (рис.2.4) показывает, что при увеличении размера осевого канала происходит быстрое насыщение якоря и ухудшение выходных силовых показателей ЛЭМД.

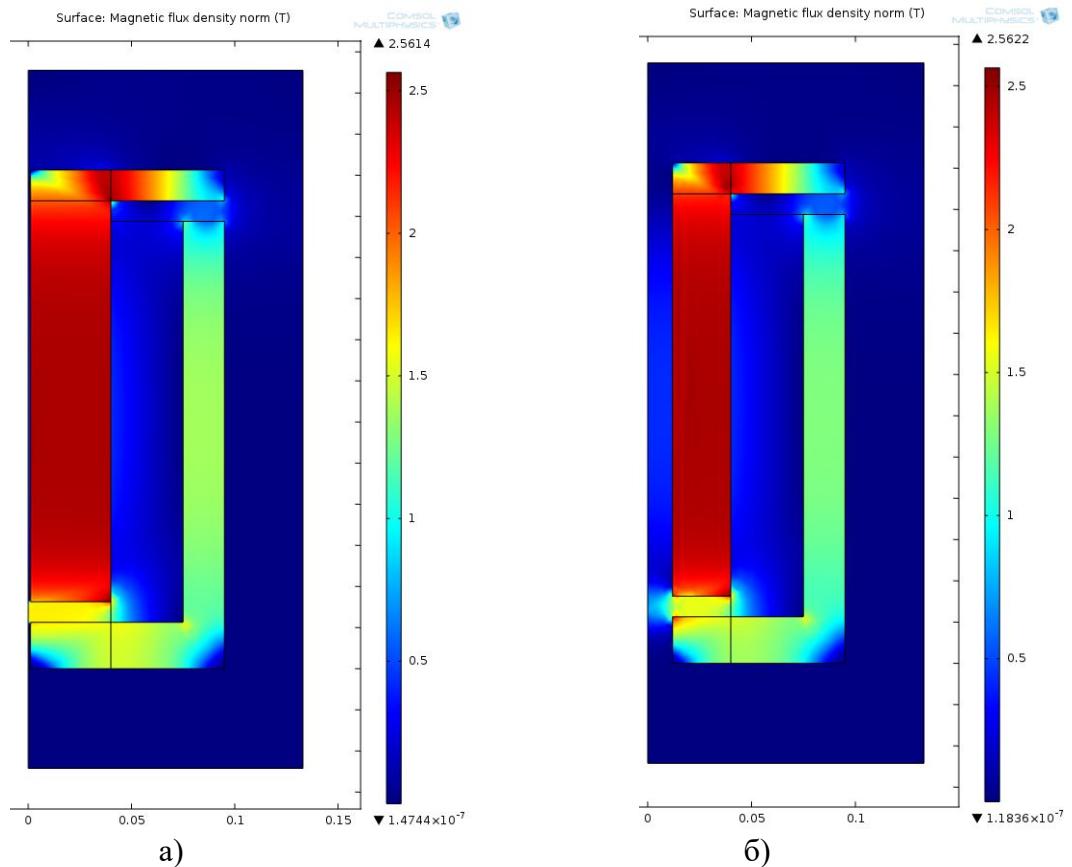


Рис.2.4 – Картины распределения магнитных полей ЛЭМД без стопа:
а) без осевого канала, б) с осевым каналом ($r' = 0,3$)

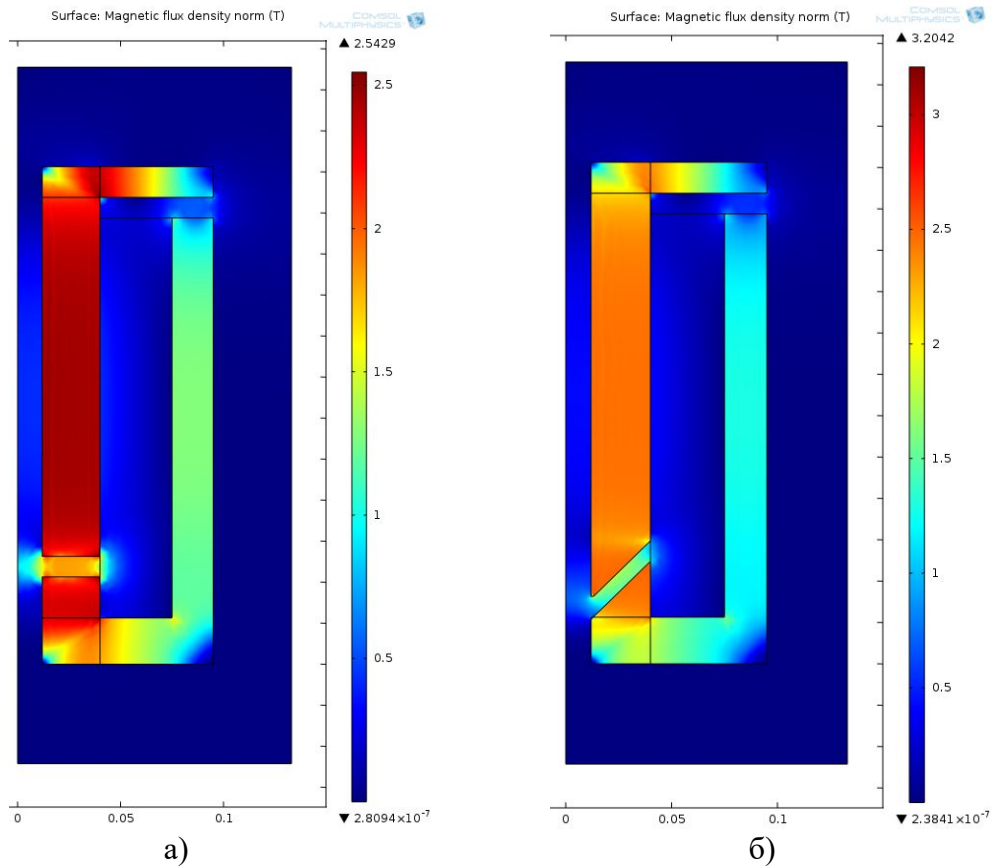


Рис.2.5 – Картины распределения магнитных полей ЛЭМД с осевым каналом ($r' = 0,3$):
а) плоским стопом, б) с конусным стопом

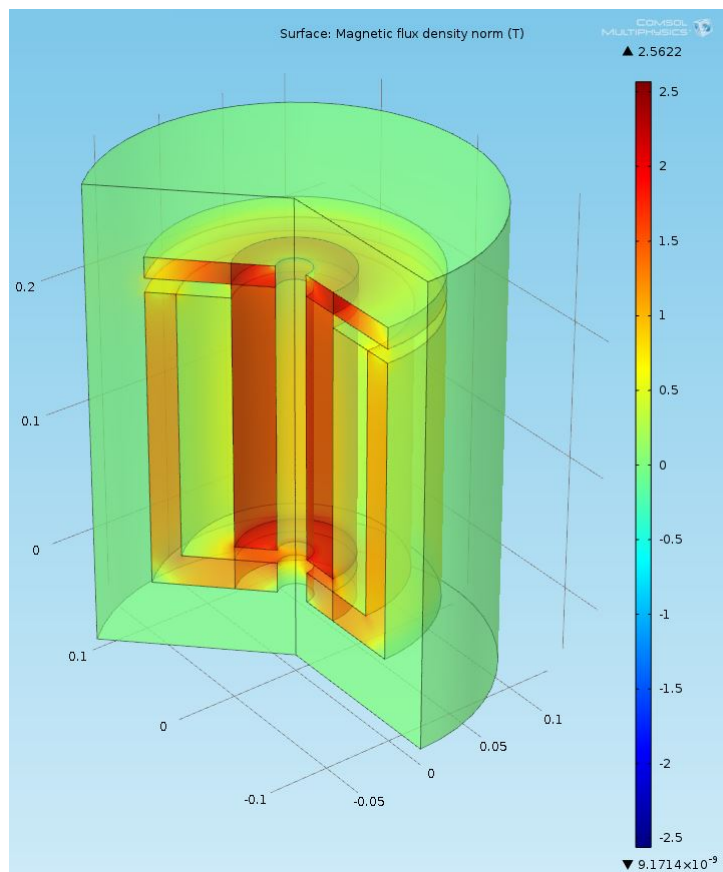


Рис.2.6 – Распределение магнитной индукции в пространстве ЛЭМД

Результаты исследования осесимметричной модели (рис.2.6) позволяют оценить распределение магнитной индукции в трехмерном пространстве.

Сравнительный анализ (рис.2.4) показывает, что при увеличении размера осевого канала происходит быстрое насыщение якоря, приводящее к ухудшению силовых показателей ЛЭМД. Проведем количественную оценку снижения выходных характеристик магнитной системы с осевым каналом.

Зависимости (2.3)-(2.5) и (2.7) позволяют определить интегральные показатели ЛЭМД [42,43]:

- механическую работу $A_{мех}$:

$$A_{мех} = \int (F_m - F_{np}) d\delta, \quad (2.10)$$

где F_m – тяговое электромагнитное усилие ЛЭМД:

$$F_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \delta}; \quad (2.11)$$

- потери в меди ΔP :

$$\Delta P = \int R i^2 dt; \quad (2.12)$$

- при питании ЛЭМД от емкостного накопителя – остаточную энергию в нем [23,44]:

$$W_c = \frac{1}{2} C \left(U_{c.n} - \frac{1}{C} \int i dt \right)^2, \quad (2.13)$$

где C – электрическая емкость накопителя; $U_{c.n}$ – начальное напряжение заряда емкостного накопителя;

- потребленную ЛЭМД электрическую энергию:

$$W_{эл} = \int u i dt; \quad (2.14)$$

- КПД цикла срабатывания ЛЭМД:

$$\eta = \frac{A_{мех}}{W_{эл}}. \quad (2.15)$$

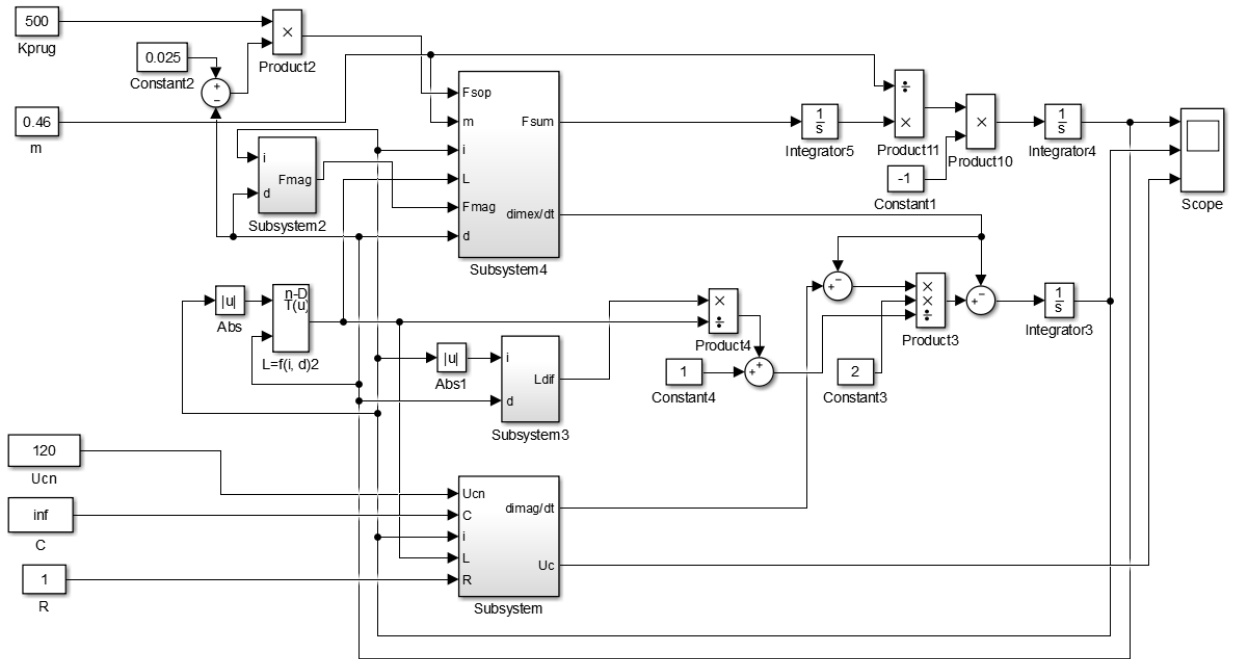


Рис.2.7 – Полная структурная схема расчетов динамики работы ЛЭМД.

Алгоритм определения динамических характеристик представляется следующим образом [42,45,263]:

1. Определяется интенсивность изменения тока в обмотке ЛЭМД:

$$\frac{di}{dt} = \frac{2}{1 + \frac{L_{\text{диф}}}{L}} \left(\frac{di_{\text{маг.}}}{dt} - \frac{di_{\text{мех.}}}{dt} \right), \quad (2.16)$$

где $L_{\text{диф}}$ – дифференциальная индуктивность обмотки ЛЭМД, учитывающая нелинейность свойств магнитных материалов двигателя, в том числе, процесс насыщения магнитопровода:

$$L_{\text{диф}} = \frac{iL_{(i, \delta)} - (i + \Delta i)L_{(i + \Delta i, \delta)}}{\Delta i}, \quad (2.17)$$

где Δi – расчетная величина приращения тока, формирующая значение L согласно (2.7) при неизменной величине рабочего зазора ЛЭМД $\delta = \text{const}$; $di_{\text{маг}}$ – дифференциал тока, определяющий изменение магнитной энергии двигателя на интервале dt :

$$\frac{di_{\text{маг}}}{dt} = \frac{u - iR}{L}; \quad (2.18)$$

$di_{\text{мех}}$ – дифференциал тока, определяющий изменение механической энергии двигателя на интервале dt :

$$\frac{di_{\text{мех.}}}{dt} = \frac{(F_{\text{эл.м}} - F_{\text{сопр}})}{iLm} \frac{dx}{dt}. \quad (2.19)$$

2. Определяется значение координаты якоря при срабатывании ЛЭМД:

$$\delta = \frac{1}{m} \iint (F_{\text{эл.м}} - F_{\text{сопр}}) dt dt. \quad (2.20)$$

Определение динамических характеристик (2.10)-(2.20) выполнено в среде Simulink. Визуализация представленной последовательности вычислений иллюстрируется структурной схемой (рис.2.7) из совокупности блоков-подсистем, выполняющих соответствующие элементарные алгоритмы.

Охарактеризуем кратко блоки-подсистемы:

- блок «Subsystem» определяет величину дифференциала приращения тока согласно (2.18), его составляющие представлены на рис.2.8. В этом блоке величина u определяется как напряжение на обкладках питающего конденсатора:

$$u = U_{\text{с.н}} - \frac{1}{C} \int i dt - iR; \quad (2.21)$$

при питании ЛЭМД от источника неограниченной мощности емкость C принимают равной $C=\infty$;

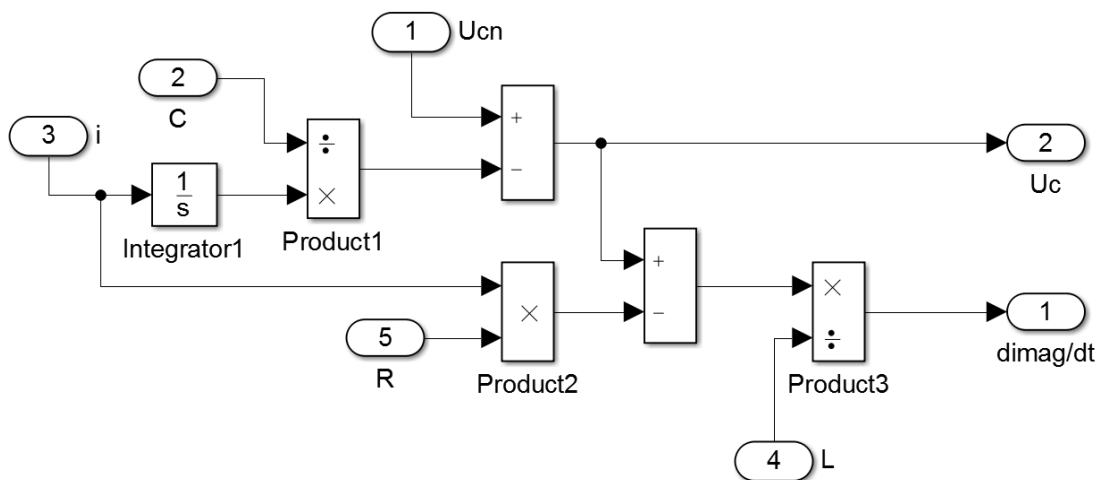


Рис.2.8 – Блок расчета производной $di_{\text{маг}}/dt$ согласно выражению (2.18)

- блок «Subsystem 1» рассчитывает интегральные показатели цикла работы ЛЭМД на основании выражений (2.10)-(2.15);
- блок «Subsystem 2» рассчитывает величину электромагнитного усилия, ЛЭМД, согласно выражению (2.11), составляющие которого представлены на рис.2.9;

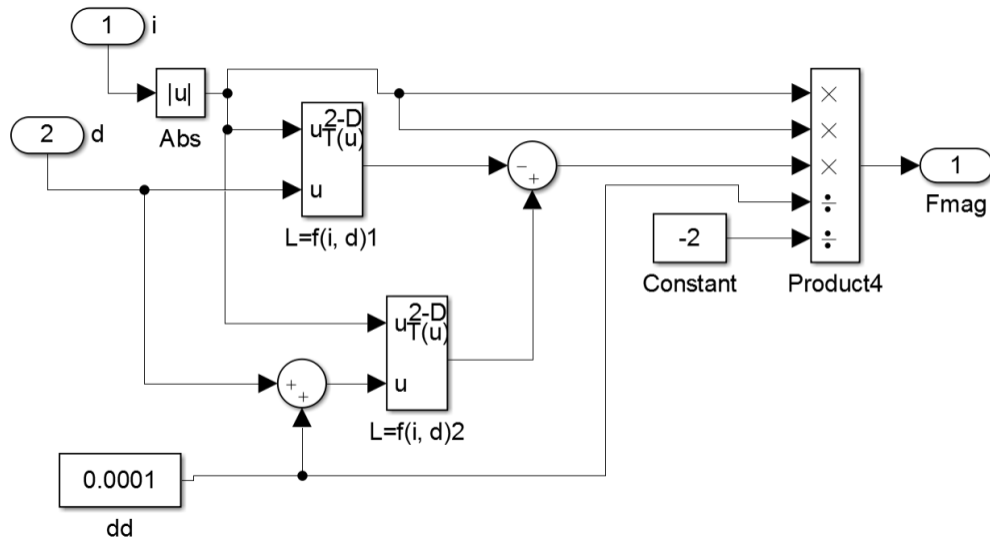


Рис.2.9 – Составляющие блока расчета электромагнитного усилия

- блок «Subsystem 3» определяет значение дифференциальной индуктивности согласно (2.17). Составляющие блока показаны на рис.2.10;

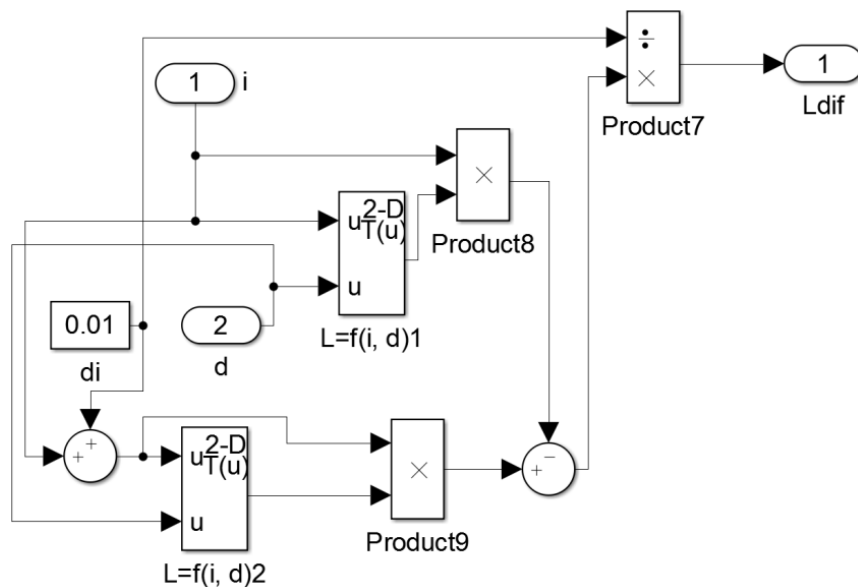


Рис.2.10 – Составляющие блока расчета дифференциальной индуктивности

- блок «Subsystem 4» определяет значения производной тока в соответствии с (2.19), а также оценивает результирующее усилие на якоре ЛЭМД, ис-

пользуемое при расчете координаты якоря согласно (2.20). При этом противодействующим усилием задается усилие возвратной пружины:

$$F_{\text{пр}} = k(x_h - x), \quad (2.22)$$

где k – жесткость возвратной пружины; x_h – длина возвратной пружины при рабочем зазоре δ_h . Составляющие блока «Subsystem 4» представлены на рис.2.11.

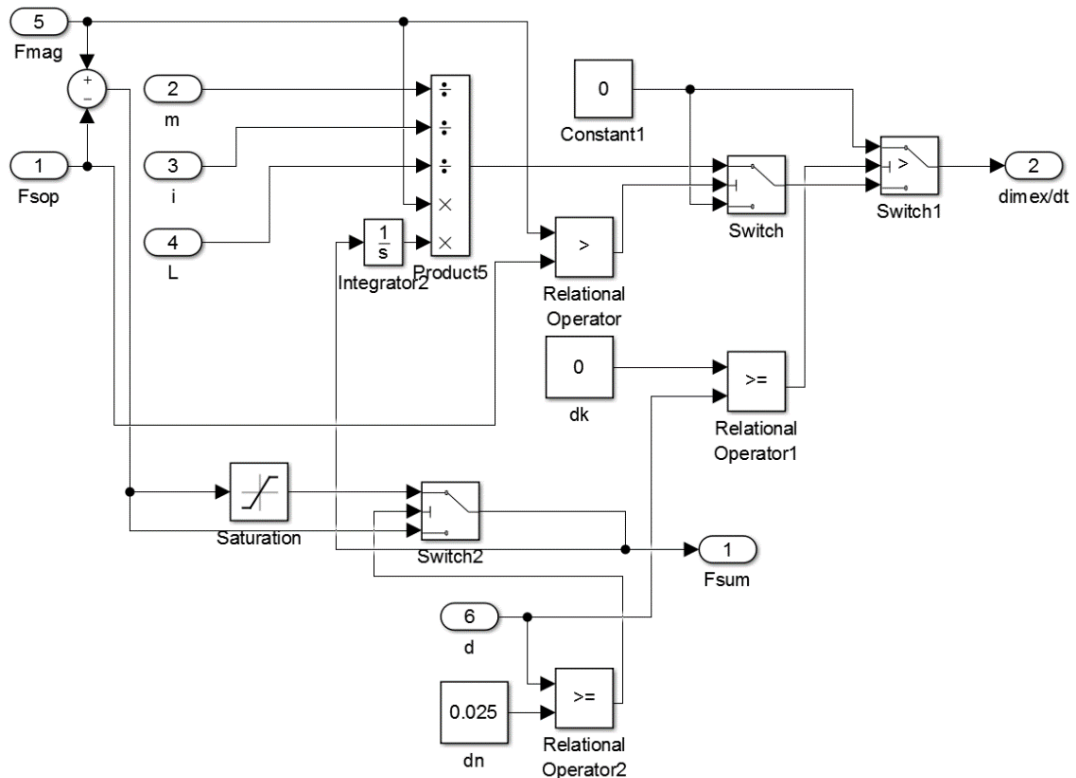


Рис.2.11 – Блок расчета производной $di_{\text{мех}}/dt$ согласно выражению (2.19)

Взаимосвязь между блоками, представленная на рис.2.8 формирует цикличность проведения расчетов. Уравнения (2.7) и (2.8) решаются методом Рунге-Кутты. Шаг интегрирования переменный, максимальное значение шага задается 0,0001 с, минимальная величина шага определяется автоматически.

Разработанная математическая модель ЛЭМД (рис.2.7) позволяет оценивать влияние относительного радиуса r' осевого канала на выходные показатели ЛЭМД:

– интегральную работу:

$$A_u = \int_{\delta_h}^{\delta_k} F_m d\delta, \quad (2.23)$$

где δ_n , δ_k – начальное и конечное значение рабочего воздушного зазора ЛЭМД;

– кинетическую энергию якоря:

$$A_{y\partial} = \frac{m_y V_{y\partial}^2}{2}, \quad (2.24)$$

где $V_{y\partial}$ – предупредная скорость якоря; m_y – масса якоря, зависящая от относительного радиуса r' осевого канала (рис.2.12).

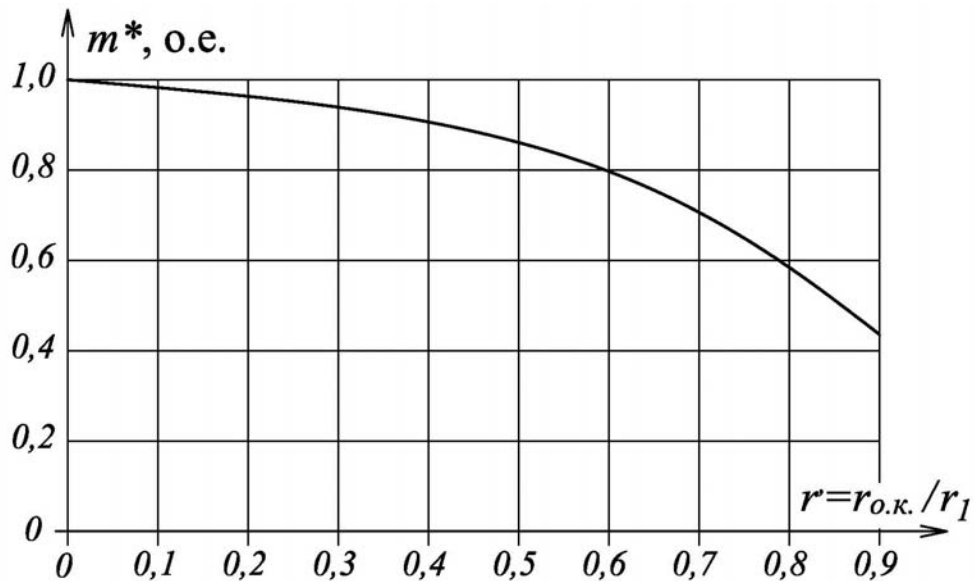


Рис.2.12 – Зависимость массы якоря ЛЭМД от относительного радиуса r' осевого канала

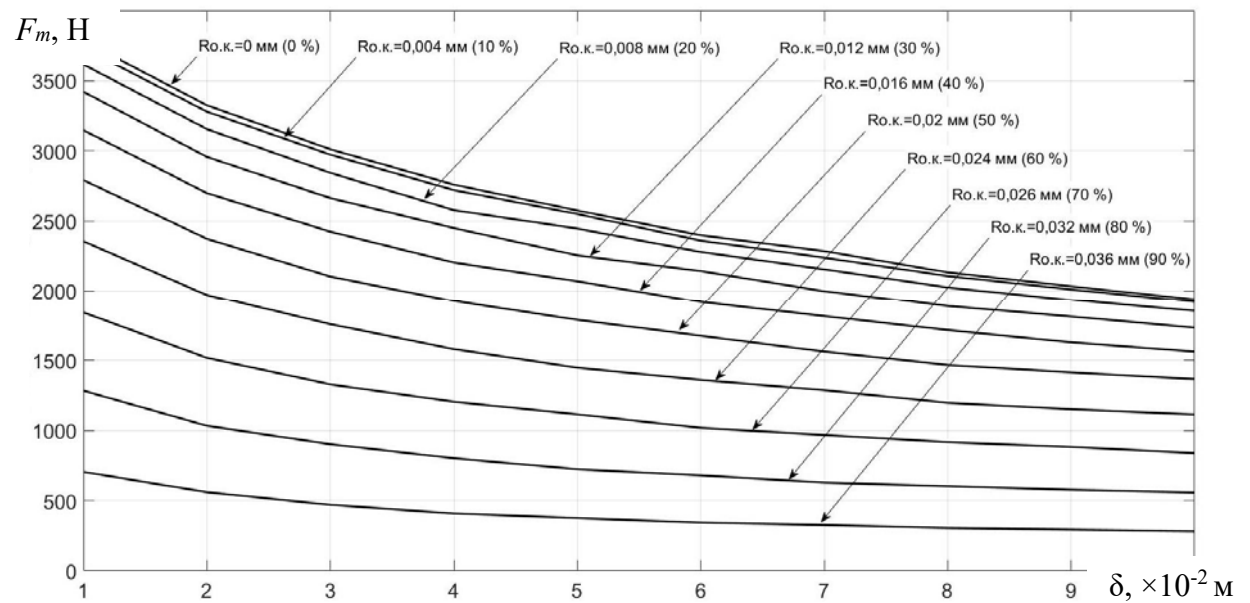


Рис.2.13 – Силовые статические характеристики $F_m = f(\delta)$ при различных значениях относительного радиуса r' осевого канала

Для примера рис.2.13, рис.2.14 и рис.2.15 для двигателя (рис.2.1) показаны соответственно силовые статические характеристики $F_m = f(\delta)$ при различных значениях r' и зависимость относительной интегральной работы $A_u^* = f(r')$.

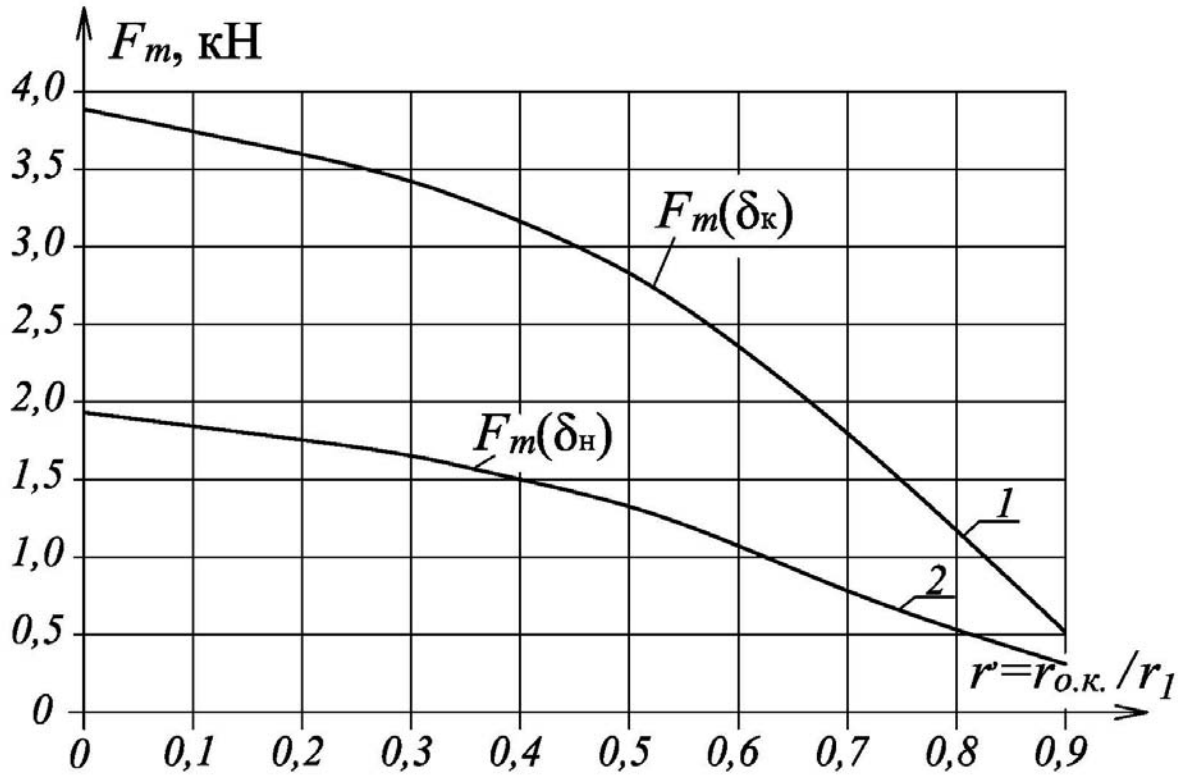


Рис.2.14 – Силовые статические характеристики $F_m = f(r')$ при $\delta_k - const$ (кривая 1) и $\delta_H - const$ (кривая 2).

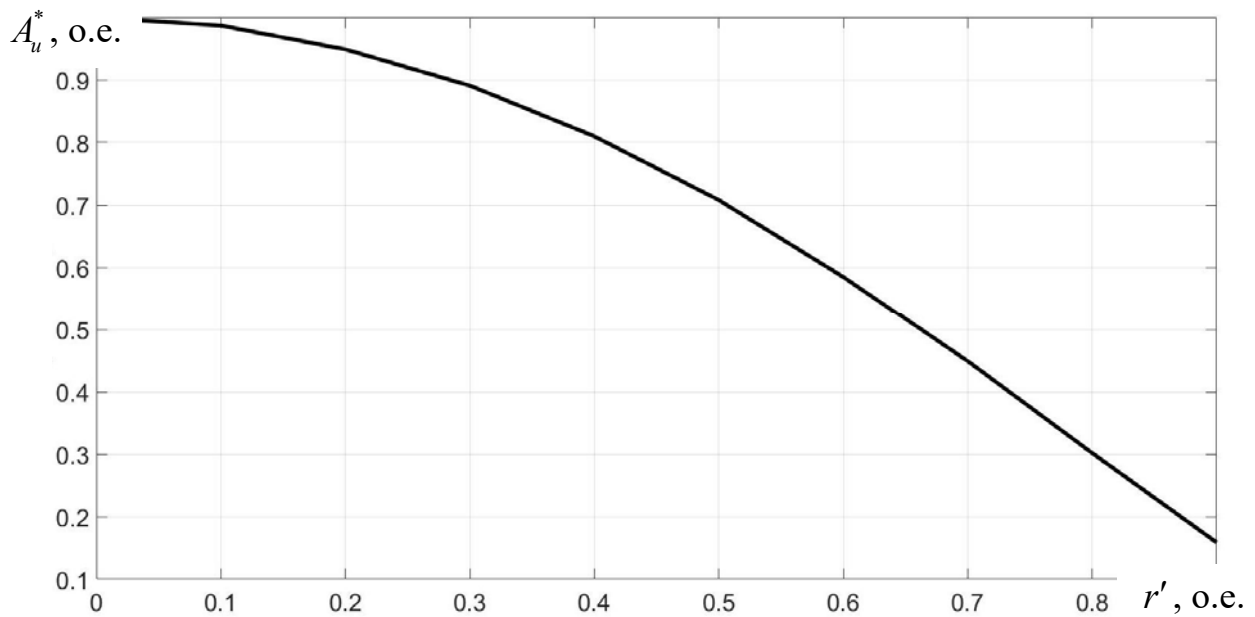


Рис.2.15 – Зависимость относительной интегральной работы $A_u^* = f(r')$.

Предварительный анализ диаграмм $F_m = f(r')$ (рис.2.14) и $A_u^* = f(r')$ (рис.2.15) показал, что сквозной осевой канал в магнитной системе ЛЭМД ухудшает как начальное (рис.2.14, кривая 2) и конечное (рис.2.14, кривая 1) относительные тяговые усилия $F_m^* = \frac{F_m}{F_m^{ок}}$ (табл.2.4), так и относительную интегральную работу $A_u^* = \frac{A_u}{A_u^{ок}}$, по сравнению с ЛЭМД без осевого канала ($A_u^{ок}$, $F_m^{ок}$, A_u , F_m – интегральная работа и тяговое усилие ЛЭМД с осевым каналом и без него соответственно).

Табл.2.4 – Зависимость тягового усилия от величины относительного радиуса осевого канала

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

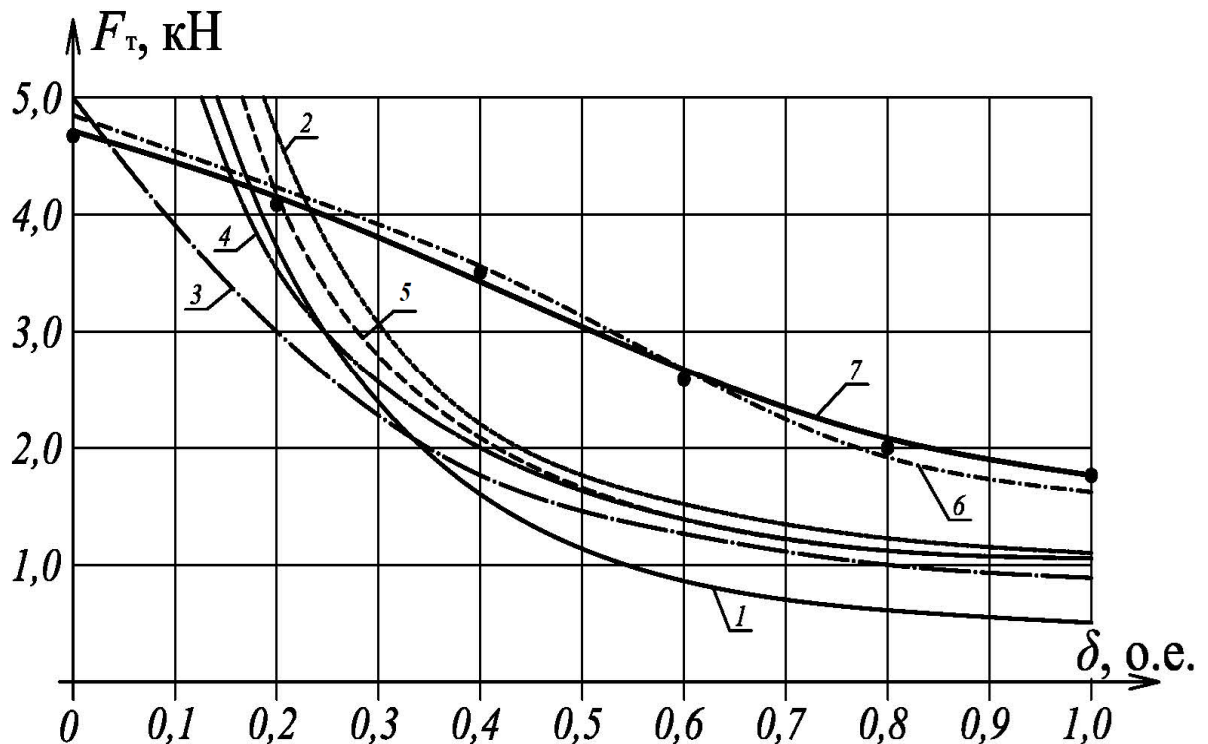


Рис.2.16 – Силовые характеристики ЛЭМД: 1 – без стопа; 2 – со стопом; 3 – при $r' = 0,7$; 4 – при $r' = 0,3$; 5 – при $r' = 0,1$; 6 – расчетная характеристика ЛЭМД с конусной рабочей поверхностью якоря и стопа при $r' = 0,3$; 7 – экспериментальная характеристика ЛЭМД с конусной рабочей поверхностью якоря и стопа при $r' = 0,3$.

Сопоставление и обработка диаграмм рис.2.13-рис.2.15 и анализ табл.2.4 показывает, что значения F_m^* и A_u^* ухудшатся, в среднем, не более чем на 15 % по сравнению с магнитными системами без осевого канала, если отношение радиусов осевого канала $r_{o.к.}$ и втяжной части r_1 якоря ограничивается значениями, не превышающими $r' = \frac{r_{o.к.}}{r_1} \leq 0,3$.

Характеристики (рис.2.16), полученные моделированием при исследовании магнитных систем ЛЭМД [108], позволяют рекомендовать к использованию, в частности в приводе безударных машин, например, кормораздаточных транспортеров, линейный электромагнитный двигатель с конусной рабочей поверхностью якоря и стопом (рис.2.1,в) и представляются предпочтительными при формировании необходимого для транспортера относительно равномерного тягового усилия по ходу якоря [119,125,127].

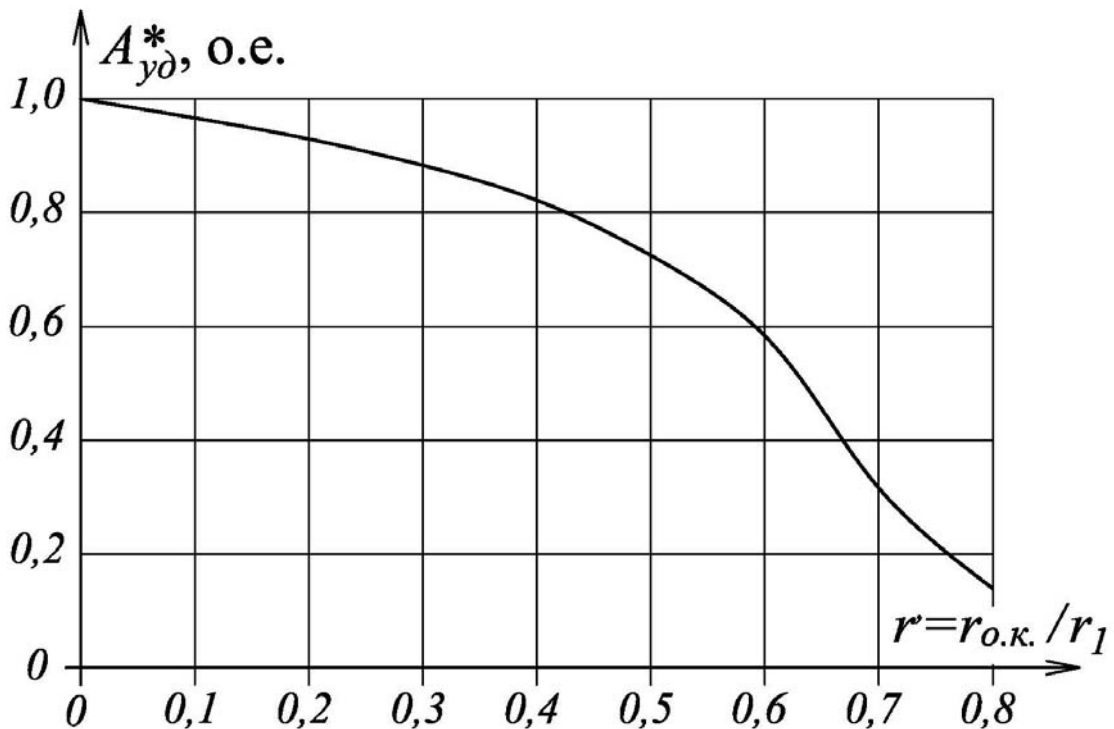


Рис.2.17 – Влияние величины относительного радиуса осевого канала на энергию удара

Математическая модель (рис.2.7) позволяет оценить влияние величины относительного радиуса осевого канала r' на энергию $A_{y\delta}^* = \frac{A_{y\delta}}{A_{y\delta}^{ок}}$ удара ($A_{y\delta}^{ок}$,

A_{y0} – энергия удара ЛЭМД с осевым каналом и без него, соответственно).
 Диаграмма зависимости $A_{y0}^* = f(r')$ показана на рис.2.17.

Анализ зависимости $A_{y0}^* = f(r')$ (рис.2.17) показал, что изменение осевого канала до значения $r' \leq 0,3r_l$ снижает энергию удара не более чем на 15 %. Дальнейшее увеличение r' , например, до $r' = 0,6r_l$, соответственно, более чем на 40 % уменьшает механическую энергию двигателя.

Таким образом, использование в магнитной системе ЛЭМД сквозного осевого канала с радиусом не более 0,3 от радиуса r_l якоря несколько ухудшает выходные показатели, однако представляется необходимым при построении ударных машин, например, для погружения в грунт длинных продольно-неустойчивых стержней в грунт [71,83,195,228].

2.3 Оптимальные геометрические соотношения в магнитных системах ЛЭМД

Создание ЛЭМД для привода ударных и безударных машин предполагает оценку основных показателей двигателя при известных требованиях к системе. Определяющие взаимные геометрические соотношения влияют на энергопреобразовательные процессы в ЛЭМД-приводах, полноту использования активных материалов и выходные характеристики изделия.

Характерные подходы и методы определения конструктивных показателей ЛЭМД-приводов представлены в работах [15,105,131,135,136,149,162,167,196]. Определяющим здесь представляется выходная механическая энергия, например, для устройства погружения стержневых элементов в грунт с учетом выражения (1.4), или затрачиваемая работа $A_{мех}$ для кормораздаточного транспортера [124]:

$$A_{мех} = F_c \delta, \quad F_c = F_{np} + F_n + \left[gq_{p.o.} \omega + gq_{\kappa} f + \rho_{\kappa} g f h_{cl}^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right] L, \quad (2.25)$$

где F_c – противодействующее усилие транспортера; F_{np} – сила упругости возвратного элемента; F_n – сила сопротивления устройства для обеспечения тре-

буемого натяжения исполнительного органа; q_k, q_{po} – удельная масса корма и исполнительного органа; ω, f – коэффициент сопротивления транспортера и трения корма; h_{cl}, ρ_k – высота слоя и плотность корма; φ – угол откоса; L – длина троса; δ – рабочий зазор.

Принимая упрощающие допущения и значения исходных величин по рекомендациям [124], оценим основные размеры двигателя. Полагая, что $A_u = A_{mex}$, найдем базисный размер r_l втяжной части якоря [149]:

$$r_l = \sqrt[7]{(A_u / 3\pi B_{\sigma} a_1 b_1 b_2)^2}, \quad (2.26)$$

$$a_1 = \sqrt{2\kappa_m \kappa_{zo} \alpha' \tau / (ПВ \rho_{\tau})}; \quad b_1 = \sqrt{(x-1)[1+(x-1)]/y}; \quad b_2 = B_k^* (1-q) - 0,5 \Psi_n^*, \quad (2.27)$$

$$q = 0,5 \frac{\alpha + \frac{\beta B_k^{-4}}{3} + \frac{\xi B_k^{-8}}{5}}{\alpha + \beta B_k^{-4} + \xi B_k^{-8}}, \quad (2.28)$$

где A_u – интегральная работа двигателя; $B_{\sigma} = 1$ Тл – базисная величина магнитной индукции ($B_{\sigma} = I T l$); a_1, b_1, b_2 – константы. $\kappa_m, \kappa_{zo}, \alpha$ – коэффициент: теплоотдачи ($\alpha = 0,9 \dots 2,4$); заполнения обмотки; эмпирический, с учетом теплоотдачи; ρ_{τ} – удельное сопротивление медного провода обмотки; τ – превышение температуры; $ПВ$ – продолжительность включения; x, y – безразмерные коэффициенты [149]; B_k^* – относительная индукция ферромагнитных элементов ЛЭМД при нулевом рабочем зазоре; Ψ_n^* – относительное значение начального потокосцепления; q – константа [149]; α, β, ξ – аппроксимирующие коэффициенты.

Значения других величин и порядок их определения рассмотрен, например, в [149].

Принцип взаимности [130,132,251] – удобный метод научного познания, позволяющий оценить интегральную работу A_u по статическим характеристикам двигателя [146,148,149,224]:

$$A_{mex} = 0,5 A_u \text{ или } A_u = 2 A_{mex}. \quad (2.29)$$

Тогда, с учетом (2.26), значения внешнего радиуса обмотки r_2 и ее длины l_k , наружного радиуса r_3 корпуса-статора

$$r_2 = (1,5 \dots 1,6) r_1, \quad l_\kappa = 3r_1, \quad (2.30)$$

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad (2.31)$$

$$V_\partial = \pi r_1^3 (x^2 + 1)(y + 2e); \quad V_\mu = \pi r_1^3 y(x - 1);$$

$$V_{cm} = \pi r_1^3 (x^2 + 2y + 1); \quad V_\gamma = \pi r_1^2 (l_\kappa + e(1 + x^2)) \quad (2.32)$$

где V_∂ , V_μ , V_{cm} , V_γ – объемы материалов двигателя, обмотки, статора и якоря.

Поскольку для рассмотренного метода нахождения основных размеров ЛЭМД необходимо значение основополагающего энергетического показателя статического режима ЛЭМД – интегральной работы A_u , – необходимо получить семейство статических тяговых характеристик $F_m = f(\delta)$ при $i = \text{const}$. Определение этих показателей осуществляется с помощью математической модели (рис.2.7), либо по методике, приведенной, например, в [146,148,149,224].

Для оптимизации конструктивных параметров ЛЭМД определим величину магнитной энергии W_L в рабочих зазорах ЛЭМД [175,226]. Для этого воспользуемся разделенной на конечные элементы расчетной областью магнитной системы (рис.2.2,б) [64,139,262].

Значение W_L представим в виде:

$$W_L = \int_0^{\psi_T} i(t) d\psi \approx \sum_0^n i_n \Delta\psi, \quad (2.33)$$

где ψ_T – потокосцепление машины к моменту трогания якоря, $\Delta\psi = (u_n - i_n R_{\text{обм}}) \Delta t$ – приращение потокосцепления за малый промежуток времени Δt ; u_n , i_n , $R_{\text{обм}}$ – напряжение, сила тока и сопротивление обмотки.

При определении необходимого значения суммарного потокосцепления ψ_Σ зададим каждый треугольный элемент функцией распределения потокосцепления ψ_i для якоря ψ_i^y , рабочего зазора ψ_i^z , статора ψ_i^c и обмотки ψ_i^o :

$$\left. \begin{aligned} \psi_i^{\text{я}} &= k_i^{\text{я}1} + k_i^{\text{я}2} x^{\text{я}} + k_i^{\text{я}3} y^{\text{я}}; \\ \psi_i^{\text{б}} &= k_i^{\text{б}1} + k_i^{\text{б}2} x^{\text{б}} + k_i^{\text{б}3} y^{\text{б}}; \\ \psi_i^{\text{с}} &= k_i^{\text{с}1} + k_i^{\text{с}2} x^{\text{с}} + k_i^{\text{с}3} y^{\text{с}}; \\ \psi_i^{\text{о}} &= k_i^{\text{о}1} + k_i^{\text{о}2} x^{\text{о}} + k_i^{\text{о}3} y^{\text{о}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

где x, y – среднее значение абсциссы и ординаты потокоцепления ψ_i в элементе области распределения; $k_i^{\text{я}}, k_i^{\text{б}}, k_i^{\text{с}}, k_i^{\text{о}}$ – коэффициенты, учитывающие приближенное распределение потокоцепления ψ_i в каждой вершине i -го треугольника, соответственно, якоря, воздуха, статора и обмотки [175,226].

Полагая значения потокоцеплений в вершинах треугольника $\psi_i^1, \psi_i^2, \psi_i^3$ определим коэффициенты k_i^1, k_i^2, k_i^3 из системы трех независимых уравнений для каждой из областей:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \psi_i^{\text{я}1} \\ \psi_i^{\text{я}2} \\ \psi_i^{\text{я}3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{я}1} & y_i^{\text{я}1} \\ 1 & x_i^{\text{я}2} & y_i^{\text{я}2} \\ 1 & x_i^{\text{я}3} & y_i^{\text{я}3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{я}1} \\ k_i^{\text{я}2} \\ k_i^{\text{я}3} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} \psi_i^{\text{б}1} \\ \psi_i^{\text{б}2} \\ \psi_i^{\text{б}3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{б}1} & y_i^{\text{б}1} \\ 1 & x_i^{\text{б}2} & y_i^{\text{б}2} \\ 1 & x_i^{\text{б}3} & y_i^{\text{б}3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{б}1} \\ k_i^{\text{б}2} \\ k_i^{\text{б}3} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} \psi_i^{\text{с}1} \\ \psi_i^{\text{с}2} \\ \psi_i^{\text{с}3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{с}1} & y_i^{\text{с}1} \\ 1 & x_i^{\text{с}2} & y_i^{\text{с}2} \\ 1 & x_i^{\text{с}3} & y_i^{\text{с}3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{с}1} \\ k_i^{\text{с}2} \\ k_i^{\text{с}3} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} \psi_i^{\text{о}1} \\ \psi_i^{\text{о}2} \\ \psi_i^{\text{о}3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{о}1} & y_i^{\text{о}1} \\ 1 & x_i^{\text{о}2} & y_i^{\text{о}2} \\ 1 & x_i^{\text{о}3} & y_i^{\text{о}3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{о}1} \\ k_i^{\text{о}2} \\ k_i^{\text{о}3} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Подставив (2.35) в (2.34) получим:

$$\left. \begin{aligned} \psi_i^{\text{я}} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{я}} & y_i^{\text{я}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{я}1} & y_i^{\text{я}1} \\ 1 & x_i^{\text{я}2} & y_i^{\text{я}2} \\ 1 & x_i^{\text{я}3} & y_i^{\text{я}3} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{я}1} \\ k_i^{\text{я}2} \\ k_i^{\text{я}3} \end{bmatrix}; & \psi_i^{\text{б}} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{б}} & y_i^{\text{б}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{б}1} & y_i^{\text{б}1} \\ 1 & x_i^{\text{б}2} & y_i^{\text{б}2} \\ 1 & x_i^{\text{б}3} & y_i^{\text{б}3} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{б}1} \\ k_i^{\text{б}2} \\ k_i^{\text{б}3} \end{bmatrix}; \\ \psi_i^{\text{с}} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{с}} & y_i^{\text{с}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{с}1} & y_i^{\text{с}1} \\ 1 & x_i^{\text{с}2} & y_i^{\text{с}2} \\ 1 & x_i^{\text{с}3} & y_i^{\text{с}3} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{с}1} \\ k_i^{\text{с}2} \\ k_i^{\text{с}3} \end{bmatrix}; & \psi_i^{\text{о}} &= \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{о}} & y_i^{\text{о}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & x_i^{\text{о}1} & y_i^{\text{о}1} \\ 1 & x_i^{\text{о}2} & y_i^{\text{о}2} \\ 1 & x_i^{\text{о}3} & y_i^{\text{о}3} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} k_i^{\text{о}1} \\ k_i^{\text{о}2} \\ k_i^{\text{о}3} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Комбинируя x, y и элементы обратной матрицы коэффициентов в новые функции положения, приведем (2.36) к виду:

$$\left. \begin{aligned} \psi_i^{\text{я}} &= \sum_j^3 \psi_j^{\text{я}} \xi_j^{\text{я}}(x^{\text{я}}; y^{\text{я}}); \\ \psi_i^{\text{е}} &= \sum_j^3 \psi_j^{\text{е}} \xi_j^{\text{е}}(x^{\text{е}}; y^{\text{е}}); \\ \psi_i^{\text{с}} &= \sum_j^3 \psi_j^{\text{с}} \xi_j^{\text{с}}(x^{\text{с}}; y^{\text{с}}); \\ \psi_i^{\text{о}} &= \sum_j^3 \psi_j^{\text{о}} \xi_j^{\text{о}}(x^{\text{о}}; y^{\text{о}}), \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

где ξ_j^i – линейная функция, зависящая от положения вершин i -го треугольника и его площади S_i , соответственно для якоря, рабочего зазора, статора и обмотки [175,226]:

$$\xi_j^i = \frac{1}{2S_i} [(x_{j\pm 1}^i y_{j\pm 2}^i - x_{j\pm 2}^i y_{j\pm 1}^i) + (y_{j\pm 1}^i - y_{j\pm 2}^i)x_i + (x_{j\pm 2}^i - x_{j\pm 1}^i)y_i] \quad (2.38)$$

Полное потокосцепление для каждой области ЛЭМД:

$$\left. \begin{aligned} \psi_i^{\text{я}} &= (\psi_1^{\text{я}} \xi_1^{\text{я}} + \psi_2^{\text{я}} \xi_2^{\text{я}} + \psi_3^{\text{я}} \xi_3^{\text{я}})(x^{\text{я}}; y^{\text{я}}); \\ \psi_i^{\text{е}} &= (\psi_1^{\text{е}} \xi_1^{\text{е}} + \psi_2^{\text{е}} \xi_2^{\text{е}} + \psi_3^{\text{е}} \xi_3^{\text{е}})(x^{\text{е}}; y^{\text{е}}); \\ \psi_i^{\text{с}} &= (\psi_1^{\text{с}} \xi_1^{\text{с}} + \psi_2^{\text{с}} \xi_2^{\text{с}} + \psi_3^{\text{с}} \xi_3^{\text{с}})(x^{\text{с}}; y^{\text{с}}); \\ \psi_i^{\text{о}} &= (\psi_1^{\text{о}} \xi_1^{\text{о}} + \psi_2^{\text{о}} \xi_2^{\text{о}} + \psi_3^{\text{о}} \xi_3^{\text{о}})(x^{\text{о}}; y^{\text{о}}). \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Суммарное потокосцепление ψ_{Σ} для всех элементов ЛЭМД:

$$\begin{aligned} \psi_{\Sigma} &= \psi_i^{\text{я}} + \psi_i^{\text{е}} + \psi_i^{\text{с}} + \psi_i^{\text{о}} = (\psi_1^{\text{я}} \xi_1^{\text{я}} + \psi_2^{\text{я}} \xi_2^{\text{я}} + \psi_3^{\text{я}} \xi_3^{\text{я}})(x^{\text{я}}; y^{\text{я}}) + \\ &+ (\psi_1^{\text{е}} \xi_1^{\text{е}} + \psi_2^{\text{е}} \xi_2^{\text{е}} + \psi_3^{\text{е}} \xi_3^{\text{е}})(x^{\text{е}}; y^{\text{е}}) + (\psi_1^{\text{с}} \xi_1^{\text{с}} + \psi_2^{\text{с}} \xi_2^{\text{с}} + \psi_3^{\text{с}} \xi_3^{\text{с}})(x^{\text{с}}; y^{\text{с}}) + \\ &+ (\psi_1^{\text{о}} \xi_1^{\text{о}} + \psi_2^{\text{о}} \xi_2^{\text{о}} + \psi_3^{\text{о}} \xi_3^{\text{о}})(x^{\text{о}}; y^{\text{о}}) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Полученное значение ψ_{Σ} позволяет определить величину магнитной энергии W_L в рабочих зазорах ЛЭМД и выработать рекомендации по оптимизации конструктивных и режимных параметров [226].

2.4 Процессы нагревания и интенсификация теплообмена в ЛЭМД ударного и безударного привода

Энергопреобразование в линейных электромагнитных двигателях сопровождается необратимыми потерями, проявляющимися в виде теплоты, образование которой в их активных частях нарушает тепловую однород-

ность. Это ведет к перетоку теплоты от токоведущих частей к другим элементам ЛЭМД и во внешнюю среду. При этом работа ЛЭМД сопровождается движением воздуха внутри него, а отвод теплоты осуществляется за счет перемещения внешней среды. Таким образом, двигатель является не только электромеханической, но и тепловой и гидравлической системой [29,30,46].

Особенности конструкции ЛЭМД осложняют теплоотвод с поверхности. Необходимый этап на пути достижения высоких энергетических, технико-экономических показателей ЛЭМД-приводов – оценка теплового состояния двигателя с учетом всех его конструктивных особенностей, определяющих передачу тепловых потоков [73].

Поддержание температурного режима является основной задачей организации охлаждения ЛЭМД импульсных машин. Решение ее состоит в обеспечении рационального сочетания источников тепловыделения и стоков теплоты [29,30]. Основными источниками тепловыделения в ЛЭМД являются активные части – обмотка и статор.

Потери в меди двигателя:

$$\Delta P_m = I^2 r = I^2 \rho \frac{l}{S}, \quad (2.41)$$

где $\rho = \rho_{293} [1 + \beta(T - 293)]$ – сопротивление обмотки; ρ_{293} – удельное сопротивление медного проводника при $T=293$ К; l – длина проводника; β – температурный коэффициент сопротивления; T – температура обмотки; S – поперечное сечение проводника [29].

Потери в стали зависят, в частности, от геометрии деталей якоря и статора ЛЭМД и не превышают 7 % [149].

Перенос теплоты [29,30,72,73]:

– теплопроводностью

$$q_\lambda = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (2.42)$$

– конвекцией

$$q_\alpha = \alpha (\theta_{zp} - \theta_{окр}), \quad (2.43)$$

где q_λ , q_α – плотности теплового потока; $\partial\theta$ – градиент температуры; n – нормаль к изотермической поверхности; λ – коэффициент теплопроводности; θ_{zp} , $\theta_{окр}$ – температура соответственно на границе и окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, взаиморасположение источников теплоты и теплостокков должно соответствовать требованию минимальности тепловых сопротивлений [30,72].

Для получения значений температур, позволяющих определить зоны наибольшего нагрева ЛЭМД, и формулирования обоснованных рекомендаций по совершенствованию систем принудительного охлаждения необходим тепловой и гидравлический расчет двигателя.

Наиболее строгим является метод температурного поля, основанный на решении дифференциального уравнения (2.44) при граничных условиях (2.45) - (2.47) для электромашины в целом или для части ее, определяемой тепловой симметрией или периодичностью [72,73].

$$\nabla(\lambda \nabla T) + \frac{P_a}{V_a} = 0, \quad (2.44)$$

$$q(x, y, z)_{zp} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp}, \quad (2.45)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp} = \alpha (T_{zp} - T_0), \quad (2.46)$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{z,\kappa} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{z,\kappa}, \quad (2.47)$$

где P_a – тепловыделение; T – температура; x, y, z – координаты.

В общем случае необходимо учитывать зависимость тепловыделения P_a , коэффициент теплопроводности λ и коэффициент теплоотдачи α от температуры T и координат x, y, z при граничном условии третьего рода на поверхностях, обдуваемых воздухом переменной температуры T_0 , и условии $\partial T / \partial n = 0$ на остальных поверхностях.

Решение такой задачи возможно только численными методами, например, методом конечных разностей и методом конечных элементов

[64,139,155,262]. Принципиальных трудностей расчет этим методом трехмерного поля температуры в электромашинах не имеет, однако он не применяется. В настоящее время трехмерную задачу расчета температурного поля электромашин сводят к двумерной и решают её численно или аналитически (в последнем случае вводятся ряд дополнительных допущений). В ЛЭМД с естественной вентиляцией приходится учитывать взаимное влияние всех элементов и расчетная область получается слишком сложной. Поэтому здесь ограничиваются расчетом поля в наиболее теплонапряженных элементах двигателя.

В работах [72] утверждается, что в настоящее время расчет температурных полей ЛЭМД «успешно реализуется на персональном компьютере с использованием современного комплекса программ, основным достоинством которого является возможность рассчитывать тепловые характеристики электромагнитных двигателей с различной геометрией. Примером современного программного обеспечения может служить *Elcut*, в основу которого положен метод геометрической декомпозиции, являющийся расширением традиционной конечно-элементной техники, что позволяет добиваться оптимальных проектных решений в минимальные сроки. *Elcut* дает возможность решать задачи теплопередачи (стационарные и нестационарные) в линейной и нелинейной постановках» [72]. При решении задач нагрева и охлаждения используется уравнения теплопроводности для линейных (2.48), (2.49) и нелинейных задач (2.50), (2.51) плоской (2.48), (2.50) и осесимметричной конструкций (2.49), (2.51).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (2.48)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = -q - c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = -q(\theta) - c(\theta) \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (2.50)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(\theta) r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = -q(\theta) - c(\theta) \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (2.51)$$

где t – время; q – удельная мощность тепловыделения; $c(\theta)$ – удельная теплоемкость; ρ – плотность.

В стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равно нулю.

При анализе результатов расчета температурного поля *Elcut* позволяет оперировать локальными температурой θ и вектором плотности теплового потока $F = -\lambda \text{grad}\theta$:

$$F_x = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}, F_y = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$F_z = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z}, F_r = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \text{ – осесимметричная конструкция,}$$

и интегральными физическими величинами:

$$\Phi = \int F \cdot n ds, \quad (2.52)$$

где n – единичный вектор нормали к поверхности.

2.4.1 Процессы нагрева и охлаждения ЛЭМД

2.4.1.1 ЛЭМД кратковременного режима

Нагревание и охлаждение ЛЭМД-приводов кратковременного режима работы определяются набором факторов, которые рассмотрены, например, в [85,92,171,232,253,254].

В частности показано, что линейный электромагнитный двигатель целесообразно представить совокупностью различающихся по тепловым характеристикам элементов (рис.2.18,а): электрических – обмотка 1, элементов магнитной системы – статор 2 и якорь 5, конструктивных элементов – крышки 4, 6, прокладка 3 и др.

Тепловая схема замещения (ТСЗ) линейного электромагнитного двигателя (рис.2,18,б), которая разработана на основе схемы (рис.2.18,а), учитывает тепловые сопротивления соответственно изоляции, окислов, воздушных

зазоров между корпусом-статором и токоведущими частями ЛЭМД и др. [85,171,195].

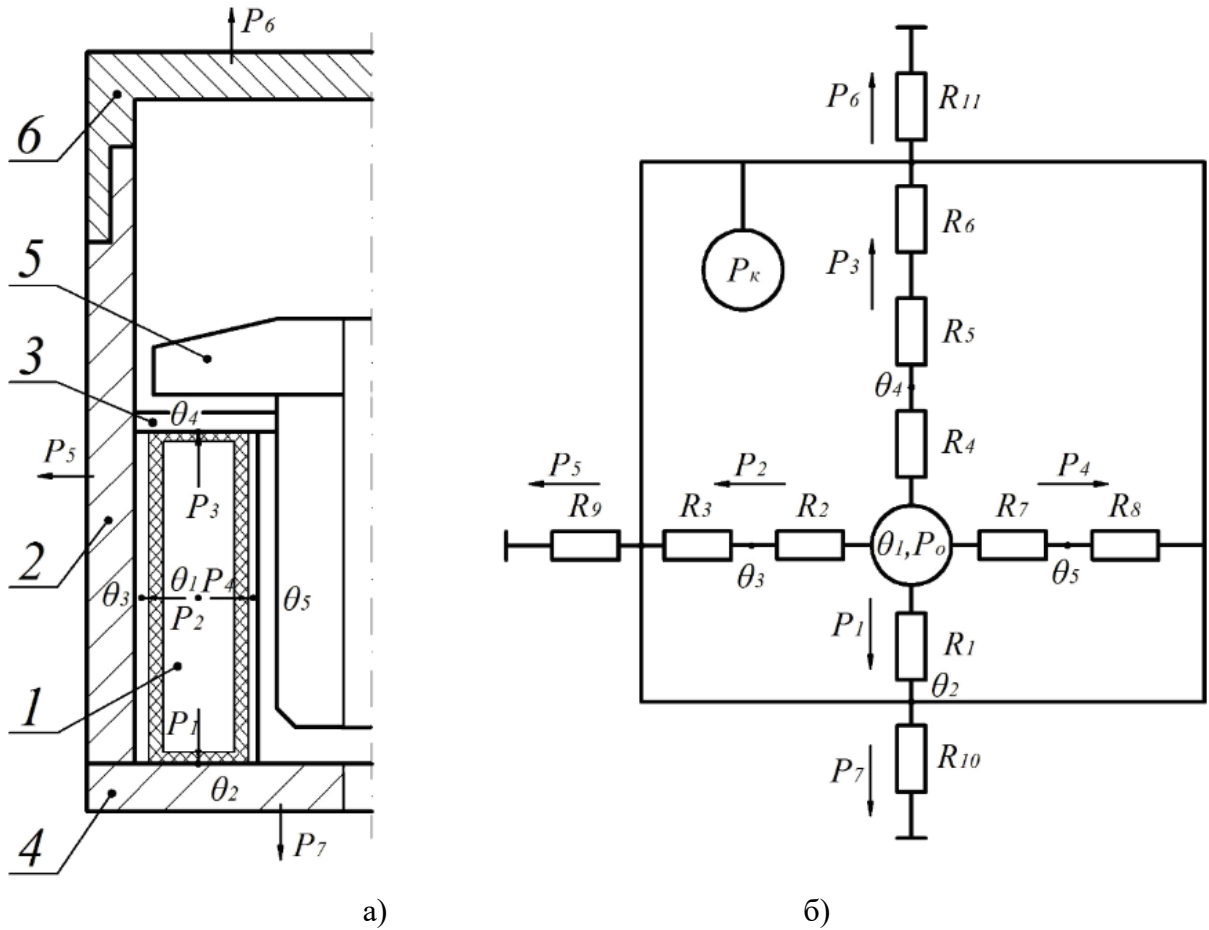


Рис.2.18 – Конструктивная схема ЛЭМД (а) и тепловая схема замещения (б)

На рис.2.19 показаны схемы распределения тепловых потоков соответственно для меди (обмотки P_o) и стали (корпуса P_κ).

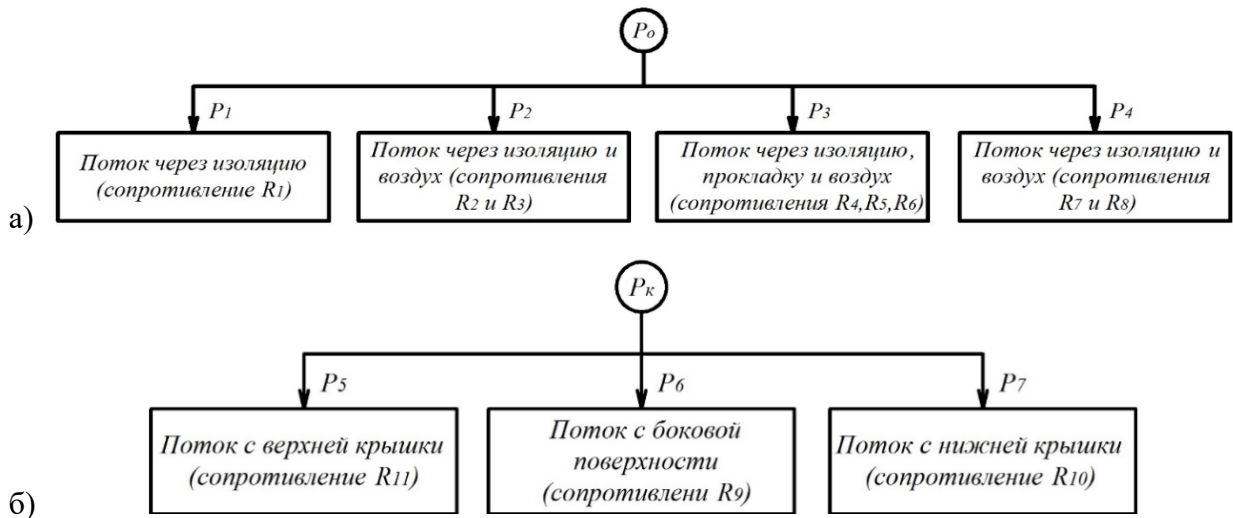


Рис.2.19 – Распределение тепловых потоков обмотки (а) и корпуса (б)

В [30] сопротивление теплопроводности R_{mn} определяется коэффициентом теплопроводности λ и геометрическими характеристиками конструктивных элементов ЛЭМД (поперечным сечением S , толщина δ_c):

$$R_{mn} = \frac{\delta_c}{\lambda S}. \quad (2.53)$$

Сопротивление теплоотдачи R_{mo} обратно пропорционально величине теплоотдающей поверхности S_o и коэффициенту теплоотдачи $\alpha = \alpha_{из} + \alpha_{кон}$, где $\alpha_{из}$, $\alpha_{кон}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно излучением и конвекцией [171,187,216]:

$$R_{mo} = \frac{1}{\alpha S_o}. \quad (2.54)$$

Из-за малой величины $\alpha_{из}$ в сравнении с $\alpha_{кон}$, в дальнейших расчетах значением $\alpha_{из}$ пренебрежем. Тогда:

$$\alpha_{кон} = k_z \sqrt[4]{\frac{\theta_k - \theta_{oc}}{L_{opr}}}; \quad (2.55)$$

где k_z – коэффициент запаса; θ_k , θ_{oc} – значение температуры статора ЛЭМД и окружающего воздуха соответственно; L_{opr} – определяющий размер, зависящий от геометрических характеристик и расположения теплоотдающей поверхности.

Определим температуры узлов ТСЗ, воспользовавшись законом Кархгофа [171,187]:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0, \quad (2.56)$$

где n – количество узлов-точек ТСЗ; P_i – тепловой поток.

$$P_{in} = \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{in}} = (\theta_i - \theta_n) g_{in}, \quad (2.57)$$

где g_{in} – тепловая проводимость; θ_i , θ_n – значения температур ближайших узлов-точек тепловой схемы замещения.

Подставляя в (2.57) значения проводимостей g_{in} и тепловых потоков P_i , получим систему уравнений и представим ее в матричной форме:

$$G\Theta = P, \quad (2.58)$$

где $G = \|g_{in}\|$ – матрица коэффициентов; $\Theta = \|\theta_i\|$ – матрица неизвестных; $P = \|P_i\|$ – матрица свободных членов.

Для определения температур в узловых точках тепловой схемы замещения (рис.2.18,б) θ_i воспользуемся матрицей G^{-1} , обратной G . Тогда, с учетом (2.58) [171,187,195]:

$$\Theta = G^{-1}P. \quad (2.59)$$

Таким образом, уравнение (2.59) позволяет определить изотермы конструктивных элементов и сформулировать рекомендации по использованию систем интенсификации охлаждения ЛЭМД [195].

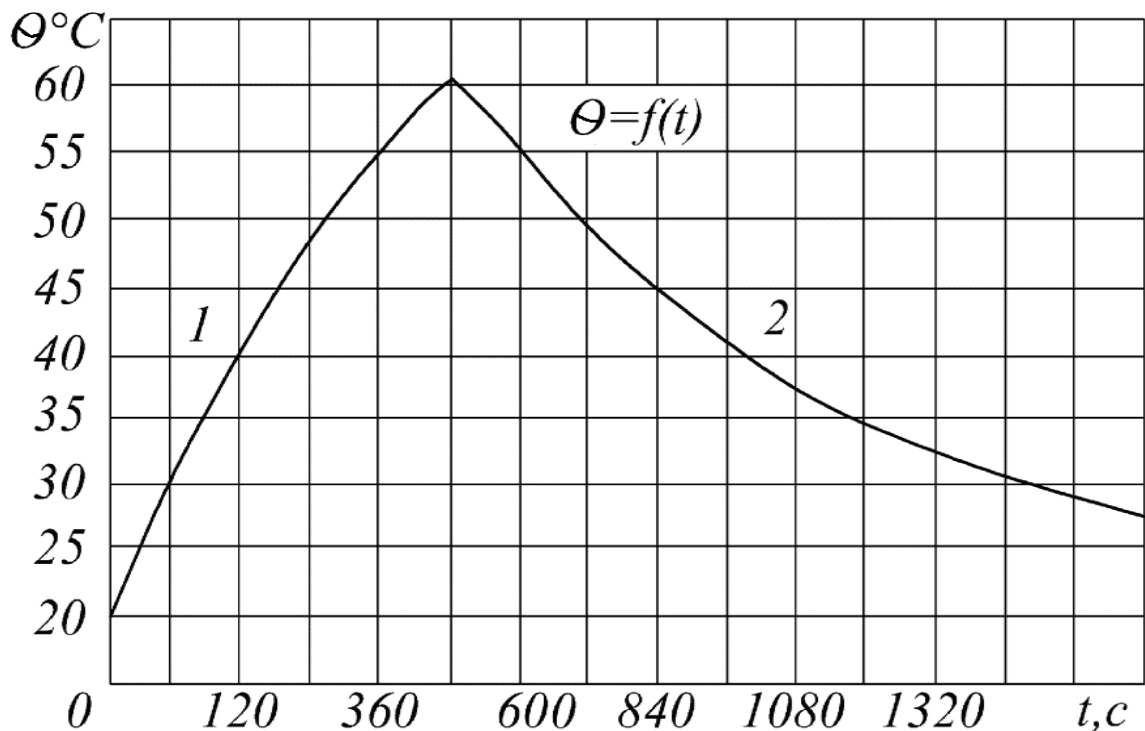


Рис.2.20 – Нагрев (1) и охлаждения (2) ЛЭМД-привода кратковременного режима работы.

Для кратковременного режима работы ЛЭМД, в качестве примера, на рис.2.20 представлена диаграмма $\theta = f(t)$ [187,216].

2.4.1.2 ЛЭМД продолжительного режима

Тепловой режим ЛЭМД-приводов машин продолжительного режима работы, например, шприцевателя колбасного фарша, устройства для погружения стержневых элементов и др., существенно зависит от ряда показателей [194,195]. В зависимости от продолжительности работы подобных машин представляется важным выбор класса изоляции обмотки ЛЭМД.

При рассмотрении процессов нагрева и охлаждения ЛЭМД используем метод конечных элементов [139,155]. В его основе лежит разбиение объекта исследования на множество элементарных объемов (рис.2.21) и использование закона сохранения энергии.

При дискретном поступлении однополярных импульсов тока в обмотку 3 ЛЭМД ее нагрев происходит только в интервале рабочего хода t_{px} . Поскольку интервал холостого хода t_{xx} якоря 1, когда ток двигателя $i=0$, мал по сравнению с постоянной времени охлаждения $T_{об}$ обмотки, процесс нагрева ЛЭМД будем считать непрерывным [190,195,225].

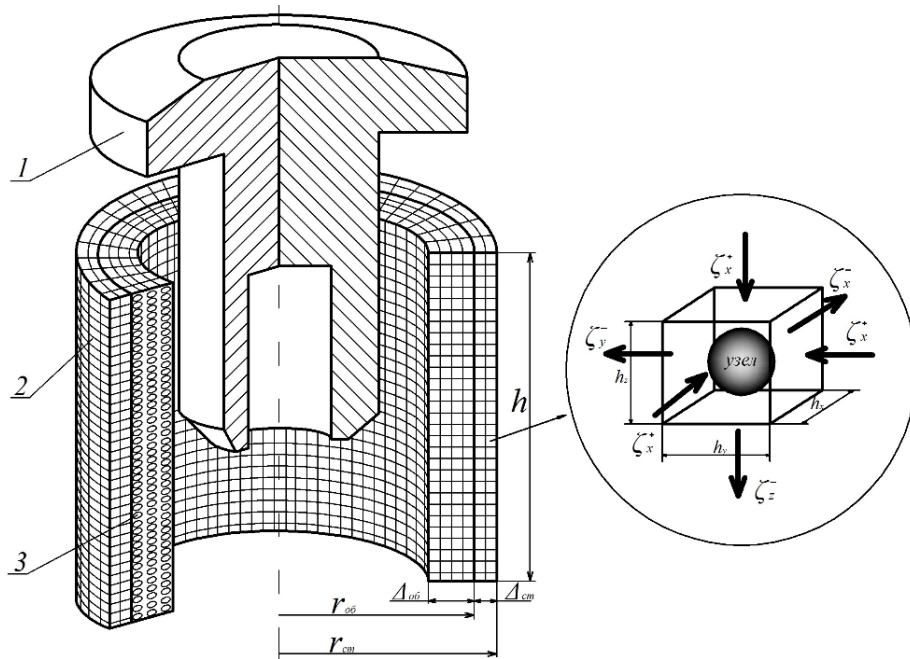


Рис.2.21 – Конечно-сеточная модель ЛЭМД

Составим уравнение теплопроводности единичного объема

$V_i = h_x \cdot h_y \cdot h_z$ для тепловых потоков:

$$(\zeta_x^+ - \zeta_x^-)h_y h_z \tau + (\zeta_y^+ - \zeta_y^-)h_x h_z \tau + (\zeta_z^+ - \zeta_z^-)h_x h_y \tau = C\Delta T, \quad (2.60)$$

где ζ – удельные плотности тепловых потоков; h_x , h_y , h_z – элементарные конечные размеры; C – теплоемкость материала; ΔT – разность температур в начале $T_{i,j,k}^m$ и конце $T_{i,j,k}^{m+1}$ временного интервала τ .

Преобразуем выражение (2.60), приведя количество теплоты в левой и правой части к единичному объему и к единице времени, разделив все члены на объем элемента V_i и интервал времени τ :

$$\frac{\zeta_x^+ - \zeta_x^-}{\tau} + \frac{\zeta_y^+ - \zeta_y^-}{\tau} + \frac{\zeta_z^+ - \zeta_z^-}{\tau} + q = C \frac{T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m}{\tau}, \quad (2.61)$$

где q – удельное тепловыделение; m – координата по времени.

Правая часть уравнения (2.61) представляет собой теплоемкость вещества рассматриваемого элемента и определяет количество теплоты, накапливающейся в единичном объеме V_i в единицу времени τ_i в том месте теплового поля, где расположен рассматриваемый элемент [190,195].

Выразим плотность теплового потока ζ через температуру в узлах сетки, воспользовавшись гипотезой о линейности свойств среды [118]:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_x^+ &= \lambda \frac{T_{i+1,j,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_x}; & \zeta_x^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i-1,j,k}^m}{h_x}; \\ \zeta_y^+ &= \lambda \frac{T_{i,j+1,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_y}; & \zeta_y^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i,j-1,k}^m}{h_y}; \\ \zeta_z^+ &= \lambda \frac{T_{i,j,k+1}^m - T_{i,j,k}^m}{h_z}; & \zeta_z^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i,j,k-1}^m}{h_z}; \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества.

При подстановке значений плотностей тепловых потоков ζ в уравнение (2.61), получим уравнение Фурье в разностной форме [118].

Для удобства расчетов в уравнение (2.62) введем безразмерный множитель τ/C , получим:

$$\left. \begin{aligned} H_x^+ &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^+; & H_x^- &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^-; \\ H_y^+ &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^+; & H_y^- &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^-; \\ H_z^+ &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^+; & H_z^- &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^- \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

Тогда, после преобразований, выражение (2.61) примет вид:

$$\begin{aligned} &A_x [T_{i+1,j,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i-1,j,k}^m] + A_y [T_{i,j+1,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j-1,k}^m] + \\ &+ A_z [T_{i,j,k+1}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j,k-1}^m] + Q = \Delta T \end{aligned} \quad (2.64)$$

где $A = \frac{\lambda \tau}{h^2 C}$ – безразмерный множитель.

Определим коэффициент A , задавшись шагом по времени τ_i , учитывая что сумма всех коэффициентов $A \leq 1$.

Так как ЛЭМД имеет осесимметричную конструкцию, полученные результаты представлены в виде графика $T = f(\Delta; \tau)$, где Δ – толщина материала на пути теплового потока, $\Delta_{об}$, $\Delta_{ст}$ – толщина обмотки 3 и статора 2 соответственно (рис.2.22).

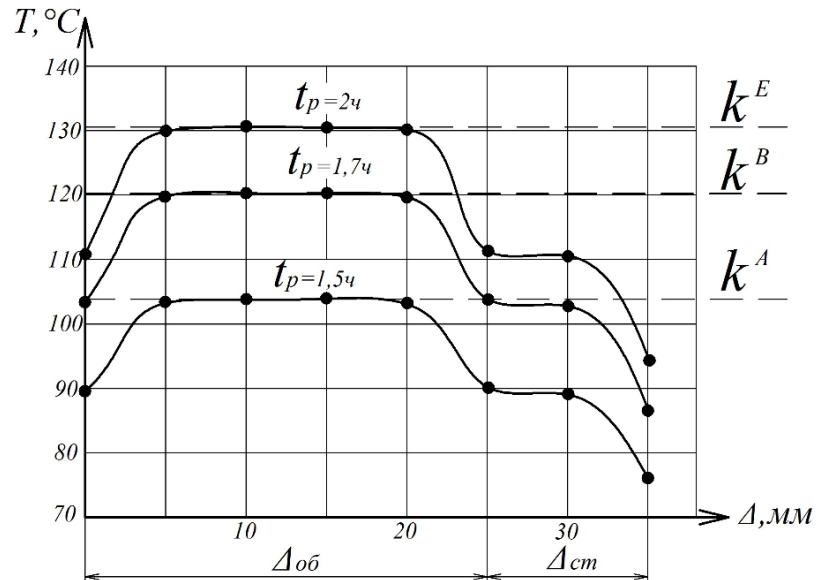


Рис.2.22 – График изменения температуры по сечению ЛЭМД в зависимости от времени работы машины

Поскольку $k^A \approx 1,12k^B \approx 1,25k^E$, переход от класса изоляции A (k^A) обмотки ЛЭМД на класс B (k^B) позволяет увеличить время работы на 12 %, а

для класса $E (k^E)$ – ещё на 13 % по сравнению с классом B и на 25 % по сравнению с классом A [190,195].

2.4.1.3 Определение стационарного температурного поля ЛЭМД

Проектирование машин с ЛЭМД требует оценки значений температуры всех конструктивных элементов, которые позволяют определить зоны наибольшего нагрева и сформулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию систем принудительного охлаждения.

Для определения температурного поля ЛЭМД воспользуемся методом тепловых схем замещения (рис.2.18) [233].

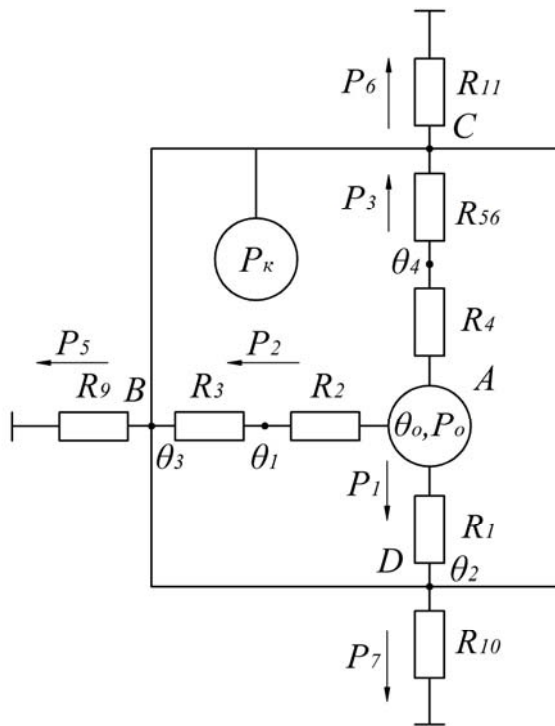


Рис.2.23 – Упрощенная тепловая схема замещения ЛЭМД.

Так как тепловой режим ЛЭМД близок к стационарному, то теплопередачей в сторону якоря можно пренебречь $P_4 = const$ и R_7, R_8, θ_5 в расчетах не учитывать. Расчеты тепловых сопротивлений изоляции обмотки показали, что $R_1 = R_4$. Таким образом, температуры на нижней 4 и верхней 6 торцевых поверхностях (рис.2,18,а) одинаковы и равны θ_2 , а тепловые потоки P_1 и P_3 можно считать равными. Тепловые сопротивления прокладки 3 R_5 и воздуха R_6 заменяем эквивалентным $R_{56} = R_5 + R_6$.

Для определения тепловых сопротивлений $R_9 \dots R_{11}$ воспользуемся рекомендациями [232,233]:

$$R=1/\alpha S. \quad (2.65)$$

Тогда, с учетом упрощений, тепловая схема замещения на рис.2.18,б примет вид, показанный на рис.2.23. По первому закону Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} m. A - P_o &= P_1 + P_2 + P_3 = 2P_1 + P_2; \\ m. B - P_5 &= P_k + P_2; \\ m. C - P_6 &= P_k + P_3; \\ m. D - P_7 &= P_k + P_1. \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

Составим систему линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2 \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_0 - \theta_1}{R_2}; \\ P_k + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_3} &= \frac{\theta_3 - \theta_{окр}}{R_9}; \\ P_k + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{56}} &= \frac{\theta_4 - \theta_{окр}}{R_{10}}; \\ P_k + \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} &= \frac{\theta_2 - \theta_{окр}}{R_{11}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.67)$$

Выражая проводимость $g=1/R$, приведем систему (2.67) к виду [69]

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2\theta_0 g_1 - 2\theta_2 g_1 + \theta_0 g_2 - \theta_1 g_2; \\ P_k + \theta_1 g_3 - \theta_2 g_3 &= \theta_3 g_9 - \theta_{окр} g_9; \\ P_k + \theta_2 g_{56} - \theta_4 g_{56} &= \theta_4 g_{10} - \theta_{окр} g_{10}; \\ P_k + \theta_0 g_1 - \theta_2 g_1 &= \theta_2 g_{11} - \theta_{окр} g_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2.68)$$

или

$$\left. \begin{aligned} g_2 \theta_1 + 2g_1 \theta_2 &= (2g_1 + g_2) \theta_0 - P_o; \\ -g_3 \theta_1 + (g_9 + g_3) \theta_3 &= P_k + g_9 \theta_{окр}; \\ -g_{56} \theta_2 + (g_{10} + g_{56}) \theta_4 &= P_k + g_{10} \theta_{окр}; \\ (g_{11} + g_1) \theta_2 &= P_k + g_{11} \theta_{окр} + g_1 \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

Представим систему уравнений (2.69) в матричной форме

$$G\Theta = P, \quad (2.70)$$

где $G=(g_{ij})$ – матрица проводимостей.

$$G = \begin{pmatrix} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (2.71)$$

$P=(P_i)$ – матрица тепловых потоков

$$P = \begin{pmatrix} (2g_1 + g_2)\theta_0 - P_o \\ P_\kappa + g_9\theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{10}\theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0 \end{pmatrix}; \quad (2.72)$$

$\Theta=(\theta_i)$ – матрица температур

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix}. \quad (2.73)$$

Для оценки возможности решения системы уравнений (2.68) воспользуемся методом Гаусса [69]. Вычислим определитель Δ_G матрицы (2.71)

$$\begin{aligned} \Delta_G &= \begin{vmatrix} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \\ &= (g_{11} + g_1) \begin{vmatrix} g_2 & 0 & 0 \\ -g_3 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & 0 & g_{10} + g_{56} \end{vmatrix} = \\ &= g_2(g_{11} + g_1) \begin{vmatrix} g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & g_{10} + g_{56} \end{vmatrix} = \\ &= g_2(g_{11} + g_1)(g_9 + g_3)(g_{10} + g_{56}). \end{aligned} \quad (2.74)$$

Положительное значение Δ_G свидетельствует о существовании решения системы (2.74).

Определим единственность решения системы уравнений (2.68) по теореме Кронекера-Капелли. Для этого представим ее в виде расширенной матрицы G^*

$$G^* = \left(\begin{array}{cccc|c} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 & (2g_1 + g_2)\theta_0 - P_o \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 & P_k + g_9\theta_{окр} \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} & P_k + g_{10}\theta_{окр} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 & P_k + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0 \end{array} \right). \quad (2.75)$$

Так как ранги матриц G и G^* совпадают с числом неизвестных, то есть $\text{rang}G = \text{rang}G^* = 4$, то система уравнений (2.68) имеет единственное решение [69].

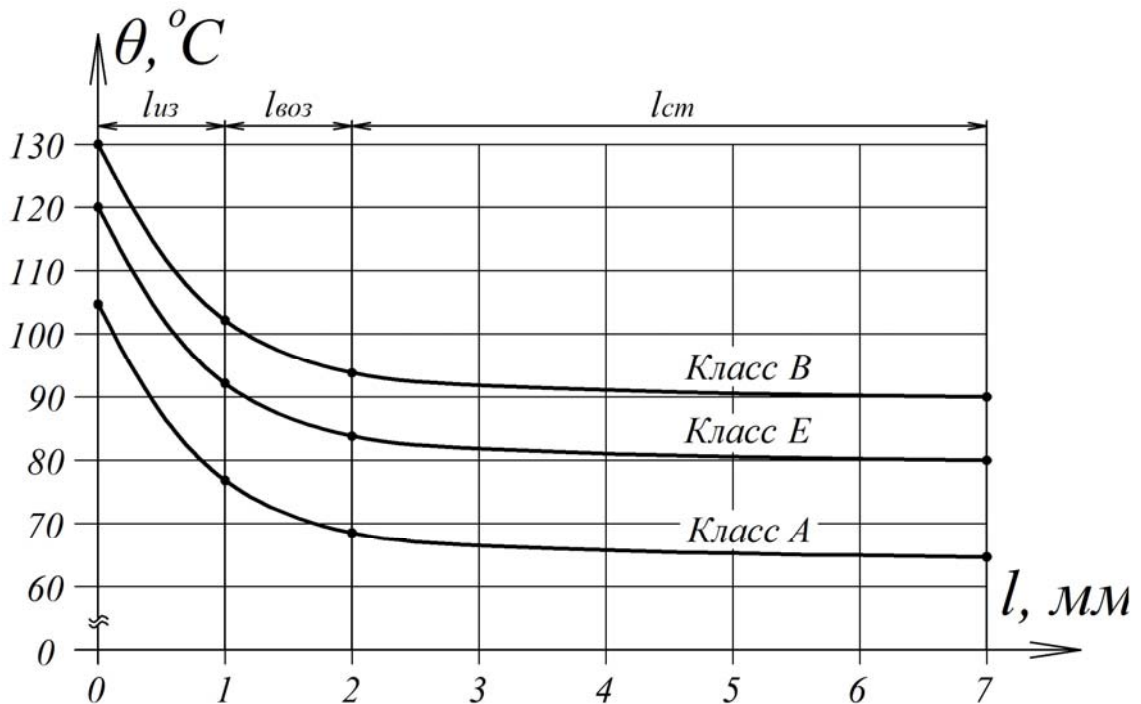


Рис.2.24 – Распределение температур для элементов ЛЭМД:
 $l_{из}$ – толщина изоляции; $l_{воз}$ – воздушный зазор; $l_{ст}$ – толщина статора.

Для определения значений температур θ_1 – θ_4 решим матричное уравнение (2.70) методом Гаусса. Введем обозначения

$$\left. \begin{array}{l} A = P_k + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0; \\ a = g_{11} + g_1, \end{array} \right\} \quad (2.76)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{(2g_1 + g_2)\theta_o a - 2Ag_1 - aP_o}{ag_2}; \\ \theta_2 &= \frac{A}{a}; \\ \theta_3 &= \frac{ag_2 P_k + ag_9 g_2 \theta_{окр} + g_3 [(2g_1 + g_2)\theta_o a - aP_o - 2Ag_1]}{ag_2 (g_9 + g_3)}; \\ \theta_4 &= \frac{a(P_k + g_{10}\theta_{окр}) + g_{56}A}{a(g_{10} + g_{56})}. \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

В качестве примера на рис.2.24 представлены кривые распределения температур для элементов ЛЭМД ударной машины [233], построенные по предлагаемой методике с учетом классов нагревостойкости изоляции, которые позволяют определить зоны наибольшего нагрева машины и сформулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию систем охлаждения машин с ЛЭМД-приводами.

2.4.1.4 Влияние контактирующих поверхностей обмотки и статора на тепловой поток в ЛЭМД

Процесс нагрева-охлаждения линейного электромагнитного двигателя зависит от факторов: характеристик питающих импульсов, частоты срабатывания, свойств и параметров обмотки и особенностей ее монтажа, которые влияют на интенсивность и распределение внутренних источников тепловыделения и условия теплопередачи. Решение об использовании в ЛЭМД активной системы охлаждения, например, для увеличения продолжительности включения, основывается на оценке теплового состояния машины и предполагает определение теплового потока. При этом характеристики контактирующих и участвующих в теплопередаче поверхностей оказывают значительное влияние на величину термических сопротивлений, температурный напор и нагрев обмотки и корпуса двигателя [118,214,215].

При определении значения Q будем полагать режим передачи тепла близким к стационарному, температуру поверхности обмоточного провода

При стационарном режиме количество теплоты Q , проходящего через слой изоляции $\Delta_{из}$ и статора $\Delta_{ст}$, одинаково и постоянно, поэтому согласно [118,215]

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{обм} - \theta_{из})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}; \\ Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{из} - \theta_{ст})}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

где $\theta_{из}$ – температура на поверхности изоляции.

Из уравнений (2.78) определим изменение температуры в изоляции $\Delta\theta_{из} = \theta_{обм} - \theta_{из}$ и статоре $\Delta\theta_{ст} = \theta_{из} - \theta_{ст}$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{из} &= \theta_{обм} - \theta_{из} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}; \\ \Delta\theta_{ст} &= \theta_{из} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.79)$$

При этом сумма изменений температуры $\Delta\theta_{из}$ и $\Delta\theta_{ст}$ составляет полный температурный напор $\Delta\theta_{полн}$

$$\Delta\theta_{полн} = \Delta\theta_{из} + \Delta\theta_{ст} = \theta_{обм} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right). \quad (2.80)$$

Таким образом, значение полного теплового потока Q через статор $\Delta_{ст}$ и слой изоляции обмотки $\Delta_{из}$ составляет

$$Q = \frac{2\pi h \cdot \Delta\theta_{полн}}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (2.81)$$

Выражение (2.81) адекватно характеризует значение Q при условии плотного контакта обмотки 2 и статора 1 (см. рис.2.25). Однако на практике, вследствие шероховатости прилегающих поверхностей, между слоями обра-

зуются воздушные зазоры создающие сопротивления оттоку теплоты Q . Аналогичное влияние оказывает оксидная пленка на статоре 1.

На рис.2.26 представлена многослойная стенка корпуса ЛЭМД с учетом толщины оксидной пленки и воздушных зазоров между обмоткой 2 и статором 1. По аналогии с (2.78) – (2.81) представим выражение для определения полного теплового потока Q для n -слойной стенки цилиндрического линейного электромагнитного двигателя [118]:

$$Q = \frac{2\pi h(\theta_1 - \theta_n)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (2.82)$$

где λ_i – коэффициент теплопередачи i -го слоя; r_i – радиус i -го слоя.

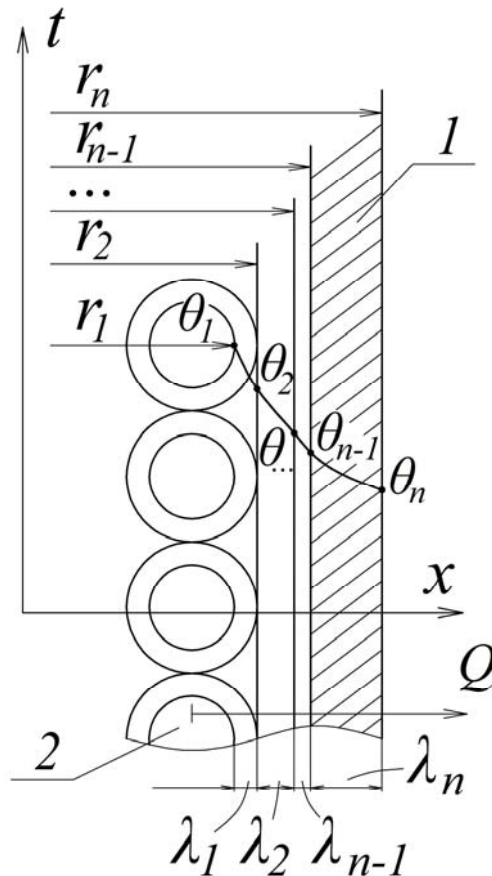


Рис.2.26 – Эскиз корпуса ЛЭМД с учетом воздушных зазоров и оксидной пленки статора

Для визуализации зависимости полного теплового потока от приращения температуры $\Delta\theta_{полн}$ для различных значений r_{n-1}/r_2 на рис.2.27 представлена зависимость $Q^* = f(\Delta\theta_{полн})$, где $Q^* = Q/Q_{\max}$. При этом $Q_{\max}$ –

максимальный тепловой поток двухслойной стенки корпуса ЛЭМД для случая без воздушных зазоров и окисной пленки статора.

При увеличении $\Delta\theta_{полн}$ значение теплового потока Q^* возрастает прямо пропорционально и в значительной степени определяется отношением r_{n-1}/r_2 . Так, даже тонкий воздушный зазор между обмоткой и статором с коэффициентом теплопроводности $\lambda_6=0,02$ ($r_{n-1}/r_2=1,02$) снижает полный тепловой поток на 50 % по сравнению с идеальной двухслойной стенкой магнитопровода [215].

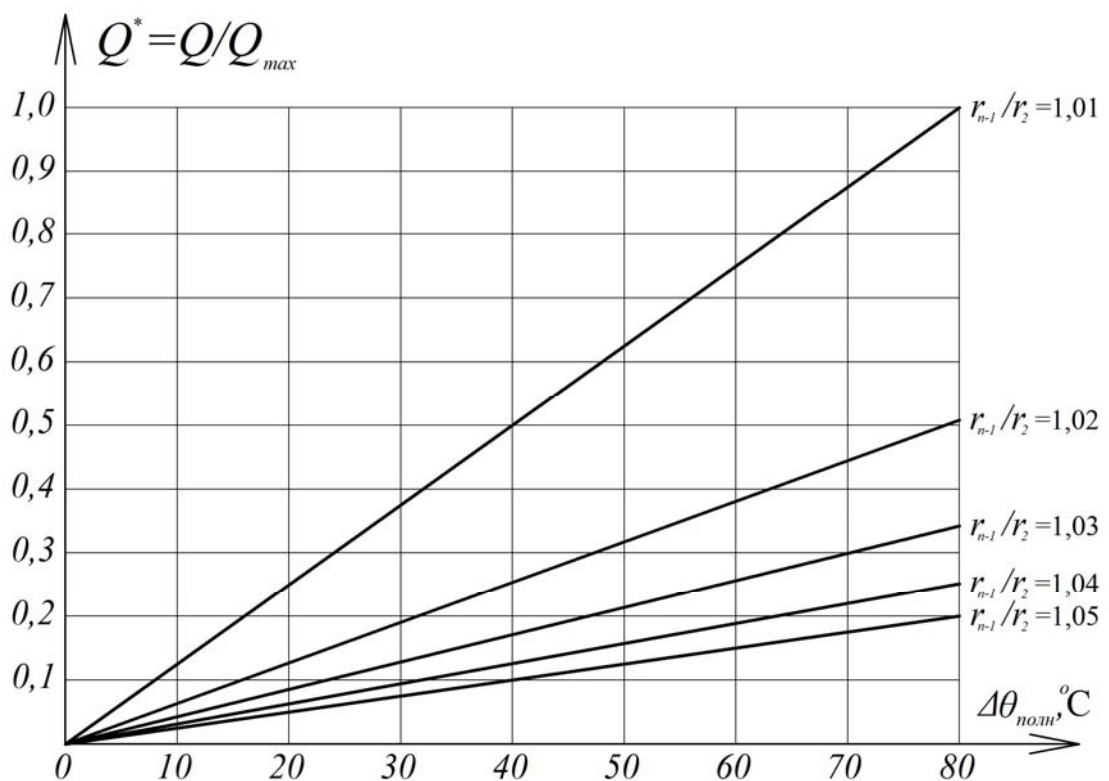


Рис.2.27 – Диаграмма зависимости относительного теплового потока Q^* от изменения температуры $\Delta\theta_{полн}$

Внешняя поверхность обмотки, изготовленной для форсированной электромагнитной машины из проводов большого сечения, отличается от цилиндрической. При этом невозможно обеспечить плотный, без воздушных радиальных зазоров или промежутков, монтаж обмотки в статоре, что ухудшает тепловой контакт повышает тепловое сопротивление Q и увеличивает температуру обмотки. В этом случае, при естественном охлаждении машины, монтажу обмотки должно предшествовать удаление окисной пленки на ста-

торе, а для улучшения теплового контакта целесообразно применять кремнийорганические теплопроводные пасты, например, СИЛОТЕРМ ЭП, *SI-LARM* и др. [215].

Для форсированных машин с ЛЭМД продолжительного режима необходима принудительная система охлаждения, в которой в предусмотренный радиальный зазор «расточка статора – обмотка» следует подавать охлаждающий воздух, например, с помощью вентилятора. При этом требования к подготовке внутренней поверхности статора снижаются.

2.4.2 Интенсификация охлаждения ЛЭМД

2.4.2.1 Способы интенсификации охлаждения ЛЭМД

В зависимости от назначения и вида технологической операции приводные ЛЭМД различаются по конструкции, габаритам, режимам питания, а приоритетными показателями принимают энергию $A_{уд}$ и частоту n ударов для прессов и ударных машин [195], начальное F_n или конечное F_k тяговые усилия для тросошайбовых транспортеров или шприцевателей колбасного фарша [190] и клипсаторов [188], соответственно.



Рис.2.28 – Классификация способов интенсификации охлаждения ЛЭМД.

Относительное многообразие конструкций и способов питания ЛЭМД выдвигает задачу выработки рекомендаций по интенсификации процессов теплопередачи.

Способы интенсификации процесса охлаждения электромагнитных двигателей целесообразно классифицировать по характерным признакам (рис.2.28) [29,30,231,253,254]:

- с естественным охлаждением (рис.2.29) без специальных вентиляторов;
- с искусственным охлаждением за счет вытяжной или нагнетательной вентиляции (рис.2.30), в которых движение охлаждающего нагретые части воздуха обеспечивается искусственно, например, с помощью вентилятора.

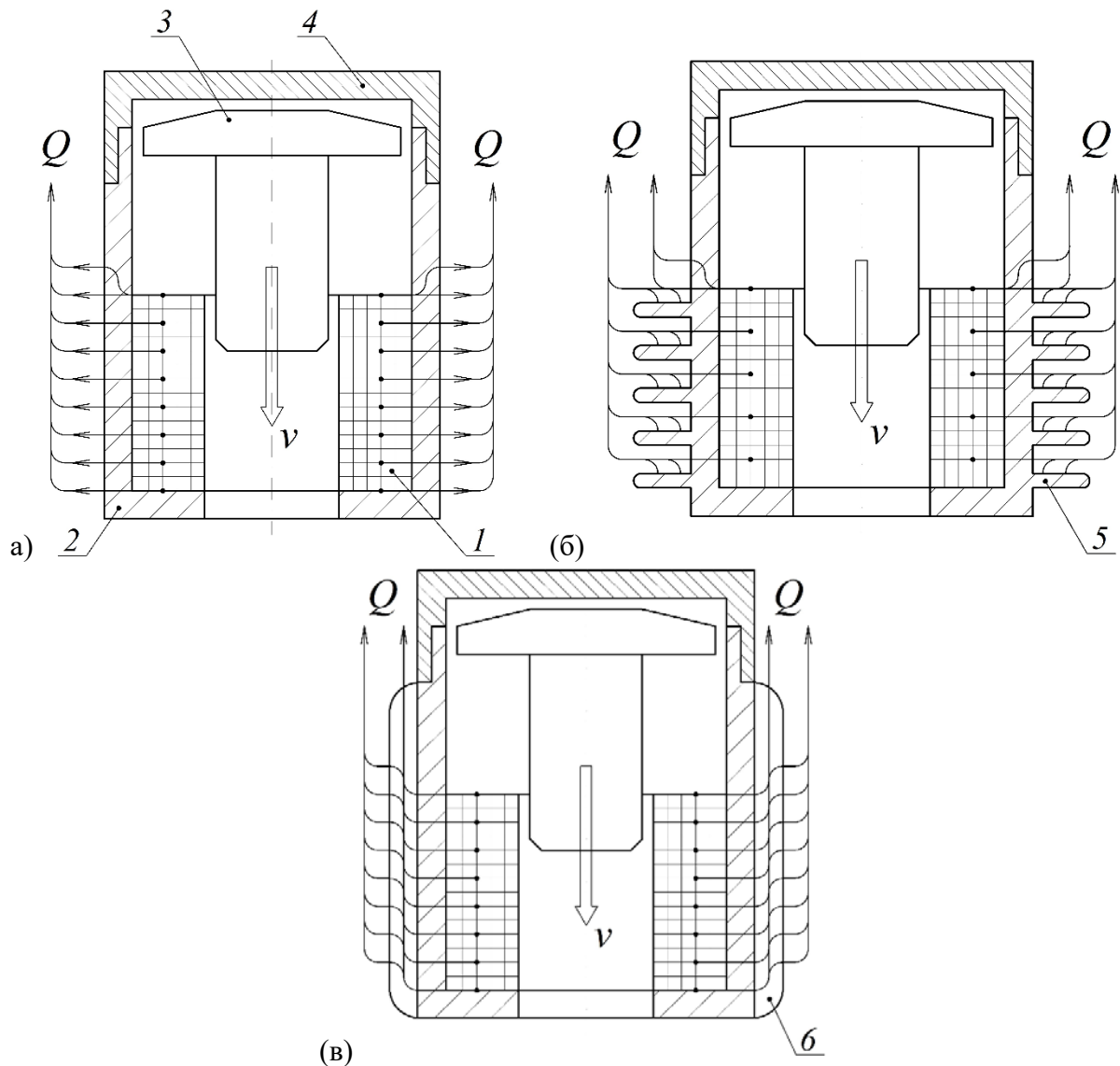


Рис.2.29 – Линейные электромагнитные двигатели с естественным охлаждением: ЛЭМД с гладкой охлаждающей поверхностью (а); ЛЭМД с радиальным (б) и осевым (в) расположением охлаждающих ребер; 1 – обмотка; 2 – статор; 3 – комбинированный якорь; 4 – крышка; 5 – радиальные ребра охлаждения; 6 – аксиальные ребра охлаждения.

Для ЛЭМД-привода кратковременного режима, например, корморазда-
точного транспортера, превышение температуры токоведущих частей незна-
чительно $\theta_{об} \geq \theta_{окр}$ и дополнительных мероприятий по интенсификации охла-
ждения не требуется. В этом случае теплоотдача будет протекать через глад-
кую боковую поверхность корпуса ЛЭМД (рис.2.29,а) [231].

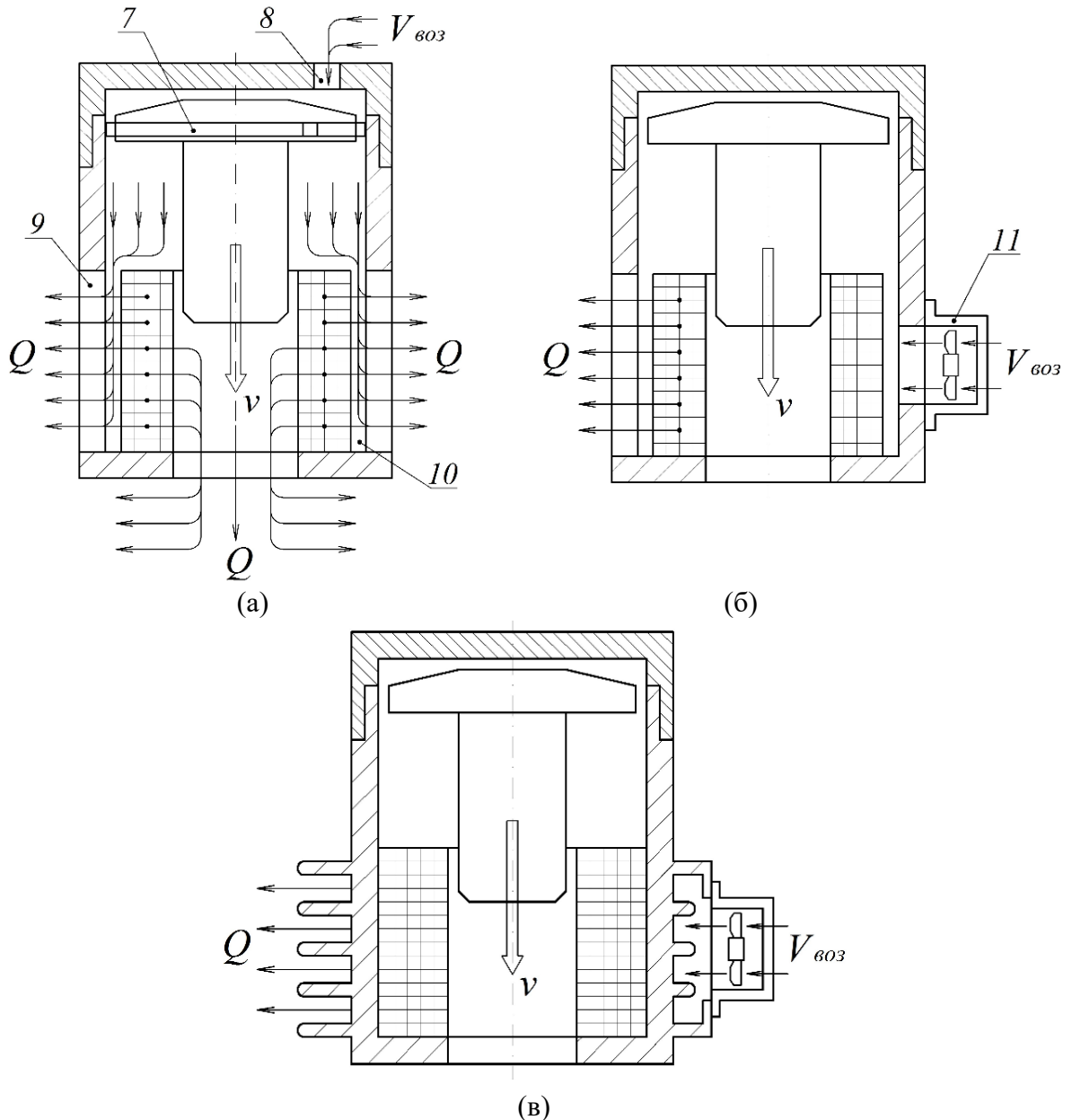


Рис.2.30 – Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением: ЛЭМД с самовентиляцией (а); продуваемый (б) и обдуваемый (в) ЛЭМД; 7 – компрессионное кольцо; 8 – вентиляционное отверстие; 9 – аксиальные вентиляционные пазы; 10 – зазор между обмоткой и статором; 11 – вентилятор.

Для продолжительности ПВ ЛЭМД повторно-кратковременного режи-
ма при $\theta_{об} \geq \theta_{об}^{дон}$, необходимо увеличить его поверхность охлаждения, напри-

мер, оребрением корпуса двигателя. Различают ЛЭМД с радиальным (рис.2.29,б) и аксиальным (рис.2.29,в) расположением охлаждающих ребер.

Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением могут быть выполнены с самовентиляцией (рис.2.30,а) и независимой вентиляцией, когда вентилятор приводится во вращение вспомогательным двигателем (рис.2.30,б,в). В электромагнитных двигателях с самовентиляцией охлаждающие воздушные потоки побуждаются комбинированным якорем 3 с компрессионным кольцом 7 и, охлаждая обмотку 1, выходят через аксиальные вентиляционные пазы 9 [231].

В зависимости от направления движения охлаждающего воздуха относительно обмотки двигателя различают ЛЭМД с аксиальной (рис.2.30,а), аксиально-радиальной и радиальной (рис.2.30,б,в) вентиляцией.

В зависимости от того, какие части в электромагнитном двигателе с искусственным охлаждением обдуваются воздухом, различают продуваемые (рис.2.30,а,б) и обдуваемые (рис.2.30,в) ЛЭМД. К первому типу относятся ЛЭМД, в которые воздух попадает извне, омывает поверхность обмотки и затем выбрасывается наружу. В обдуваемых двигателях осуществляется принудительное охлаждение только внешней развитой при помощи выступающих ребер поверхности статора.

2.4.2.2 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с развитой теплоотдающей поверхностью

Важным фактором, влияющим на теплопередачу, является величина охлаждающей поверхности корпуса двигателя [30,253].

Оребрение поверхности корпуса ЛЭМД производится с целью интенсификации процесса теплопередачи. При этом в задачу расчета оребрения входит оценка распределения температуры по ребру, количества снимаемой теплоты, веса и стоимости оребренной поверхности охлаждения. Кроме того, к ребристым поверхностям корпуса двигателя предъявляется ряд дополнительных требований: минимизация габаритных размеров и массы, эффектив-

ное использование материалов и др. В полном объеме такая задача может быть разрешена только на основе эксперимента [253].

При сравнительной оценке ребристой поверхности будем использовать коэффициент оребрения k_F [118]

$$k_F = \frac{F_{op}}{F_{2л}}, \quad (2.83)$$

где F_{op} и $F_{2л}$ – соответственно площадь оребренной и гладкой поверхностей.

Величина коэффициента k_F будет определяться удельными потерями в меди ЛЭМД, зависящими, в свою очередь, от параметров обмотки (сечения S обмоточного провода, количества n витков, размеров l, h), формы питающего импульса тока и поверхности охлаждения корпуса двигателя $F_{охл}$:

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{\Delta P}{F_{охл}}, \quad (2.84)$$

где ΔP – потери мощности в обмотке $\Delta P = I^2 R$; I – ток в обмотке; R – сопротивление обмотки.

Для определения значений ΔP воспользуемся, в частном случае, осциллограммами тока $i(t)$, напряжения $u(t)$ и перемещения $\delta(t)$ якоря за один рабочий ход (рис.2.31) [195].

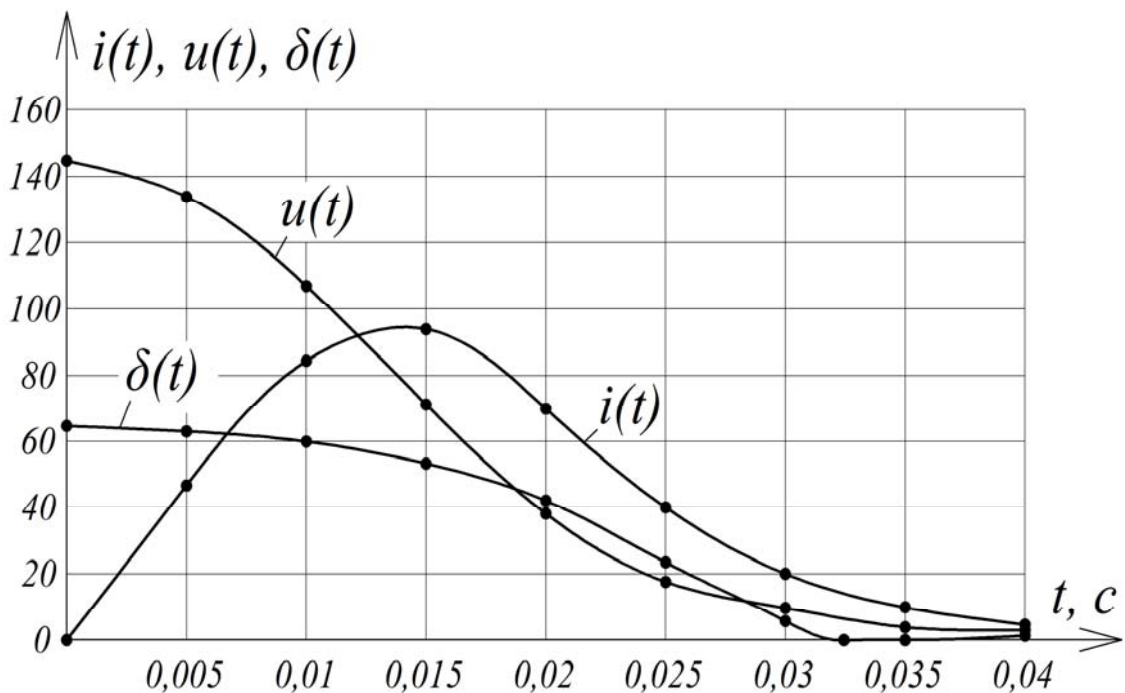


Рис.2.31 – Динамические характеристики ЛЭМД ударной машины

Эквивалентный ток $I_{\text{экв}}$ на интервале рабочего хода

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{px}}} \int_0^{t_{\text{px}}} i^2(t) dt}, \quad (2.85)$$

где t_{px} – время рабочего хода.

С учетом (2.85) выражение (2.41) преобразуется к виду

$$\Delta P = R \left(\sqrt{\frac{1}{t_{\text{px}}} \int_0^{t_{\text{px}}} i^2(t) dt} \right)^2. \quad (2.86)$$

Удельные потери $\Delta P_{\text{y}\partial}$ на рабочем ходе якоря ЛЭМД

$$\Delta P_{\text{y}\partial} = \frac{R \left(\sqrt{\frac{1}{t_{\text{px}}} \int_0^{t_{\text{px}}} i^2(t) dt} \right)^2}{F_{\text{охл}}}. \quad (2.87)$$

При дискретном поступлении однополярных импульсов тока в обмотку ЛЭМД ее нагрев происходит только на интервале рабочего хода t_{px} .

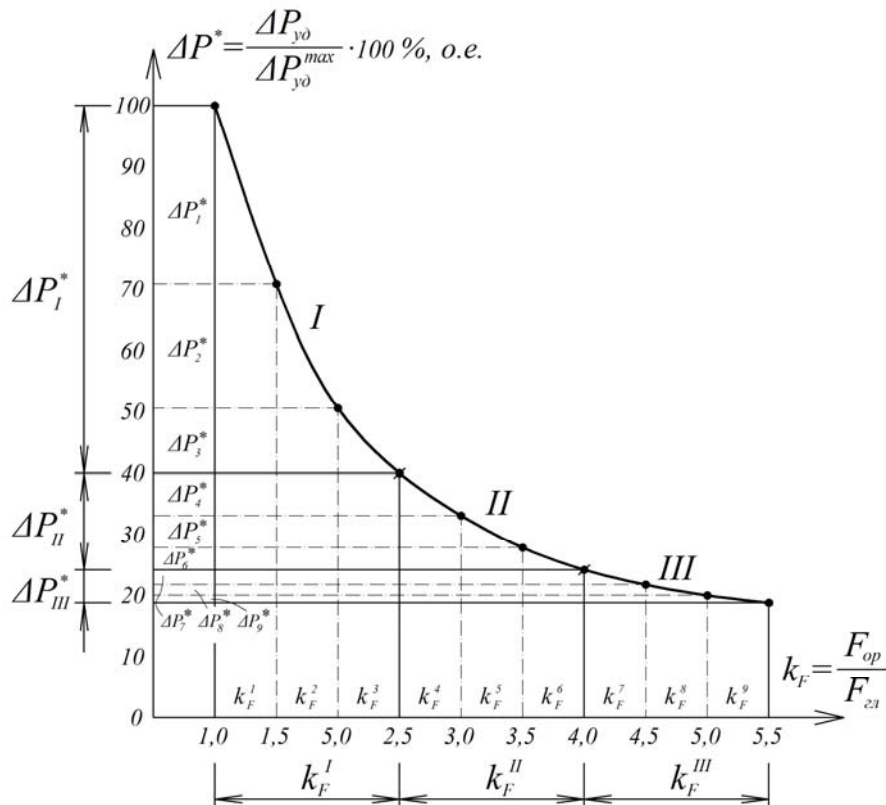


Рис.2.32 – Зависимость относительных удельных потерь ΔP^* от величины коэффициента оребрения k_F

Поскольку интервал холостого хода t_{xx} якоря, когда ток в двигателе $i=0$, мал по сравнению с постоянной времени охлаждения T_0 обмотки, процесс нагрева ЛЭМД будем считать непрерывным. Зависимость относительных удельных потерь в меди $\Delta P^* = (\Delta P_{y\partial} / \Delta P_{y\partial}^{max}) \cdot 100\%$, где $\Delta P_{y\partial}^{max}$ – удельные потери при $k_F=1$ (без оребрения), от коэффициента оребрения k_F представлена в виде диаграммы $P^* = f(k_F)$ (рис.2.32).

Для сравнения участков диаграммы воспользуемся средним значением коэффициента передачи k_{cp} на интервалах

$$\left. \begin{aligned} I - k_F &= 1,0 \dots 2,5; \\ II - k_F &= 2,5 \dots 4,0; \\ III - k_F &= 4,0 \dots 5,5, \end{aligned} \right\}$$

$$k_{cp} = \frac{\sum k_i}{i}, \quad (2.88)$$

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

$$\left. \begin{aligned} k_{cp}^I &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_1^*}{\Delta k_F^1} + \frac{\Delta P_2^*}{\Delta k_F^2} + \frac{\Delta P_3^*}{\Delta k_F^3} \right); \\ k_{cp}^{II} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_4^*}{\Delta k_F^4} + \frac{\Delta P_5^*}{\Delta k_F^5} + \frac{\Delta P_6^*}{\Delta k_F^6} \right); \\ k_{cp}^{III} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta P_7^*}{\Delta k_F^7} + \frac{\Delta P_8^*}{\Delta k_F^8} + \frac{\Delta P_9^*}{\Delta k_F^9} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.89)$$

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

С учетом (2.89) имеем

$$k_{cp}^I \approx 3,64 k_{cp}^{II} \approx 8 k_{cp}^{III}. \quad (2.90)$$

Таким образом, при создании и совершенствовании импульсных электромагнитных машин с жесткими ограничениями массы устройства, например, для переносных ударных приводов, представляется эффективным увеличение охлаждающей поверхности ЛЭМД за счет оребрения двигателя, при этом значение k_F следует принимать $k_F = 2,5$.

Увеличение значений $k_F = 2,5 \dots 4,0$ приводит к снижению относительных удельных потерь не более чем на 15 % и представляет интерес для стационарных ЛЭМД-приводов машин.

Дальнейшее повышение $k_F = 4,0 \dots 5,5$ представляется нецелесообразным ввиду значительного увеличения металлоемкости изделий [195].

2.4.2.3 Влияние оребрения корпуса ЛЭМД на эффективность системы охлаждения

Оребрение боковой поверхности корпуса линейных электромагнитных двигателей (2.29,б,в) позволяет повысить их теплоотдачу за счет увеличения площади теплоотводящей поверхности [29,254].

Максимальный теплоотвод достигается при равенстве температуры ребра и основания. Однако на практике температура ребра неравномерна по высоте; при этом величина снижения теплоотвода характеризуется коэффициентом качества ребра [29,115,254]:

$$\eta_p = \frac{P_{\text{осн}}}{P_{\text{max}}} = \frac{\int_{l_k} \alpha T dl_k}{T_{\text{осн}} \int_{l_k} \alpha dl_k}, \quad (2.91)$$

где $P_{\text{осн}}$ – тепловой поток через основание реального ребра; P_{max} – максимальный тепловой поток; $T_{\text{осн}}$ – температура основания, отсчитанная от температуры окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи; l_k – расстояние вдоль контура профиля ребра.

В качестве результирующей характеристики удобно использовать коэффициент эффективности оребренной поверхности, равный отношению

тепловых потоков через оребренную $P_{ор}$ и гладкую $P_{гл}$ поверхности (с учетом того, что температура гладкой поверхности равна температуре $T_{осн}$ основания ребер) [115,254]:

$$\eta_p = \frac{P_{ор}}{P_{гл}} = \frac{\int \int_{l_k} \alpha T dl_k + b_{осн} \int_l \alpha T_{осн} dl}{(b_{осн} + \delta_{осн}) \int_l \alpha T_{осн} dl}, \quad (2.92)$$

где l – длина ребра; $\delta_{осн}$ и $b_{осн}$ – толщина ребер и расстояние между ними по основанию соответственно.

Использование выражений (2.91) и (2.92) требует оценки распределения температуры в ребре и вдоль боковой поверхности ЛЭМД (рис.2.33) [30,254] и учета температуры окружающей среды T_o .

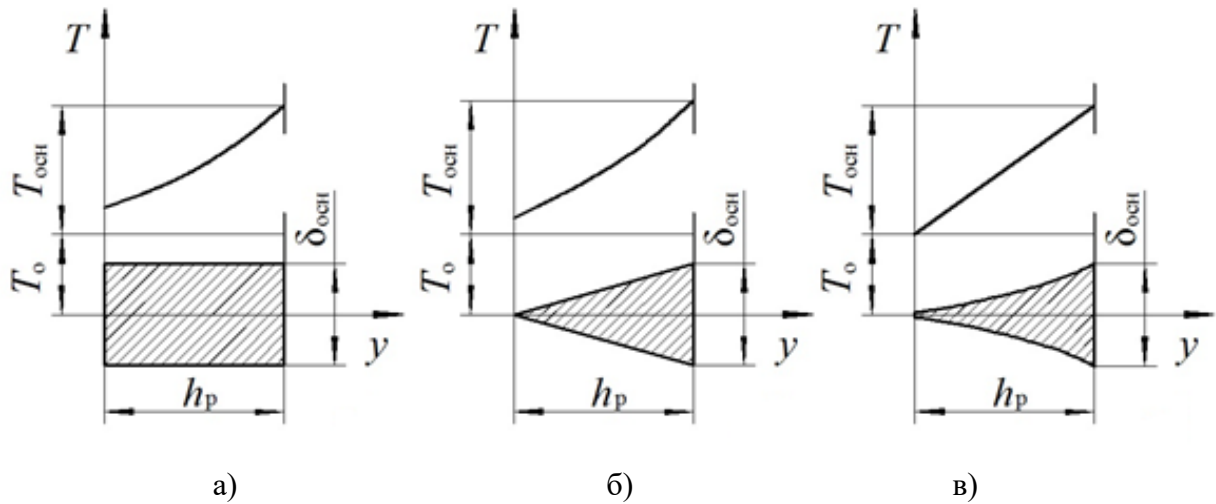


Рис.2.33 – Распределение температуры в прямых ребрах: а – прямоугольного профиля; б – треугольного профиля; в – вогнутого параболического профиля.

Эффективность охлаждения определяется в соответствии с условием

$$P_{отв} \geq \Delta P, \quad (2.93)$$

где $P_{отв}$ – потери, отводимые охлаждающей средой.

Согласно [254] потери, отводимые охлаждающей средой:

$$P_{отв} = \frac{\theta_{\max}}{\frac{1}{cQ} + \frac{1}{\alpha F}}, \quad (2.94)$$

где $\theta_{\max}$ – максимально допустимое превышение температуры активных частей электродвигателя; c – удельная теплоемкость охладителя; Q – расход охлаждающей среды; α – коэффициент теплообмена; F – площадь поверхности охлаждения.

Для случая, когда охлаждение происходит за счет контакта поверхности корпуса ЛЭМД с окружающей средой, принимают, что $Q \rightarrow \infty$, тогда отношение $\frac{1}{cQ} \rightarrow 0$, и (2.94) примет вид:

$$P_{\text{отв}} = \theta_{\max} \alpha F. \quad (2.95)$$

При оребрении площадь охлаждаемой поверхности:

$$F = 2\pi R_{\text{э}} (h + R_{\text{э}}) k_F, \quad (2.96)$$

где $R_{\text{э}}$ и h – внешний радиус и высота электродвигателя соответственно, м; k_F – коэффициент оребрения, исходя из рекомендаций $k_F = 2,5$ [195].

С учетом (2.96) преобразуем (2.95) к виду:

$$P_{\text{отв}} = 2\theta_{\max} \alpha \pi R_{\text{э}} (h + R_{\text{э}}) k_F. \quad (2.97)$$

Таким образом, при выполнении условия (2.93), оребрение поверхности ЛЭМД представляется целесообразным и рекомендуется для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме без форсированного потребления электрической энергии [115,195].

2.4.2.4 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с самовентиляцией

Повышенное значение ударной мощности ЛЭМД-приводов машин с интенсивным потреблением электроэнергии, например, для погружения металлических стержней в грунт [15,228], обеспечивается при условии форсированного потребления энергии от аккумуляторов или емкостных накопителей [195,196]. Из-за сравнительно низкого напряжения эти источники отдают в обмотку ЛЭМД во время рабочего цикла значительные токи (120...200 А). Величина соотношения между потерями и полезной энергией машины существенна, что ограничивает возможности создания на базе ЛЭМД с естествен-

ным охлаждением частотударных машин с продолжительным режимом работы. Таким образом, интенсификация процесса охлаждения ЛЭМД таких машин представляется важной.

На рис.2.34 и рис.2.35 показана конструктивная схема ЛЭМД с самовентиляцией, особенностью которого является непосредственное охлаждение окружающим воздухом токоведущих частей двигателя (обмотки) через вентиляционные каналы [185,186,195].

При подключении обмотки 6 к источнику питания якорь 3, под действием электромагнитной силы совершает рабочий ход (рис.2.34,а). Побуждаемые комбинированным якорем 3 с компрессионным кольцом 1 воздушные потоки 7, движущиеся по аксиальным каналам 4, охлаждают обмотку 6 и выходят наружу через вентиляционные отверстия 8. На холостом ходе (рис.2.34,б) якорь 3 под действием возвратной пружины 5 перемещается в верхнюю часть цилиндрического статора 2. При этом окружающий воздух засасывается через отверстия 8 и, проходя по вентиляционным каналам, охлаждает обмотку 6, а при следующем рабочем ходе удаляется наружу.

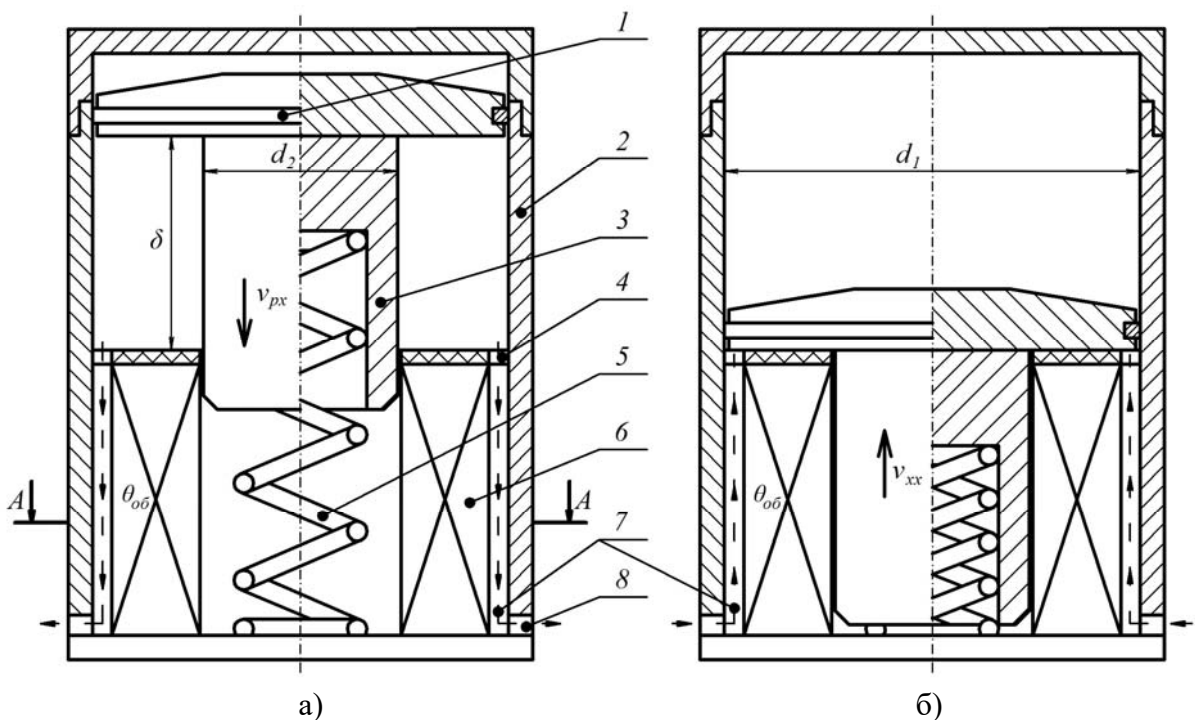


Рис.2.34 – Конструктивные схемы ЛЭМД с самовентиляцией:
а) рабочий ход; б) холостой ход

Важным для теплового расчета ЛЭМД является определение в зоне охлаждающего канала коэффициента теплоотдачи, расчет которого производится по рекомендациям [30,254]:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (2.98)$$

где λ – коэффициент теплопроводности рабочей среды, Вт/м·°С; d – диаметр входного канала, м; Nu – критерий Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и теплопроводности.

Обобщенная зависимость процесса теплоотдачи при движении воздуха внутри закрытых каналов представляется выражением [195,254]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}, \quad (2.99)$$

где $Re = \frac{v_6 \cdot d}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; v_6 – скорость движения воздуха в охлаждающем канале, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

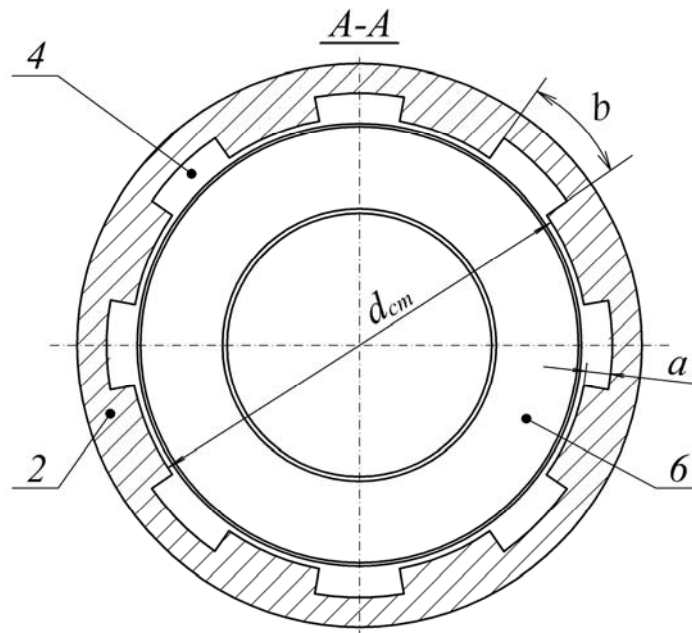


Рис.2.35 – Сечение ЛЭМД с охлаждающими каналами

В рассуждениях будем использовать гидравлический или эквивалентный диаметр сечения d_3 , определяемый следующим образом [195,254]:

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi}, \quad (2.100)$$

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

$\Pi = 2a + b \left(1 + \frac{1}{d_{cm} + 2a} \right)$ – суммарная длина линий, ограничивающих сечение, м; a – глубина паза, м; b – ширина паза по дуге, м; d_{cm} – внутренний диаметр статора (рис.2.35).

При рассмотрении течений охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах воспользуемся величиной средней расходной скорости $v_{в.ср}$ [185,195], определяемой как отношение объемного расхода воздуха $Q_в$ к площади поперечного сечения канала S :

$$v_{в.ср} = \frac{Q_в}{S}. \quad (2.101)$$

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

$$Q_в^{px} = \frac{\pi \delta}{4t_{px}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (2.102)$$

$$Q_в^{xx} = \frac{\pi \delta}{4t_{xx}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (2.103)$$

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

Таким образом, с учетом (2.99)-(2.103) выражение (2.98) примет вид:

$$\alpha_{px} = 0,0045\pi^{-0,2} \frac{\lambda \left(\frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left(\frac{\delta(d_1^2 - d_2^2)}{t_{px} v} \right)^{0,8} \cdot \left(2a + b \left(1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (2.104)$$

$$\alpha_{xx} = 0,0045\pi^{-0,2} \frac{\lambda \left(\frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left(\frac{\delta(d_1^2 - d_2^2)}{t_{xx}v} \right)^{0,8} \cdot \left(2a + b \left(1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (2.105)$$

где α_{px} и α_{xx} – коэффициенты теплоотдачи соответственно при рабочем и холостом ходах якоря ЛЭМД.

Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи ЛЭМД при рабочем α_{px} и холостом α_{xx} ходах якоря, определяемых глубиной вентиляционного паза a относительно толщины статора $a^* = a/\delta_{cm}$ и шириной паза b относительно длины окружности статора $b^* = b/l_{cm}$, представлены на рис.2.36.

Коэффициент теплоотдачи α_{px} при рабочем ходе якоря ЛЭМД составляет $\alpha_{px} \approx 20\alpha_{xx}$, что объясняется движением якоря со скоростью $v_{px} > v_{xx}$ и более интенсивным движением воздуха в вентиляционных каналах. Наибольшие значения α_{px} и α_{xx} достигаются при $a^* < 0,17$ и $b^* < 0,25$.

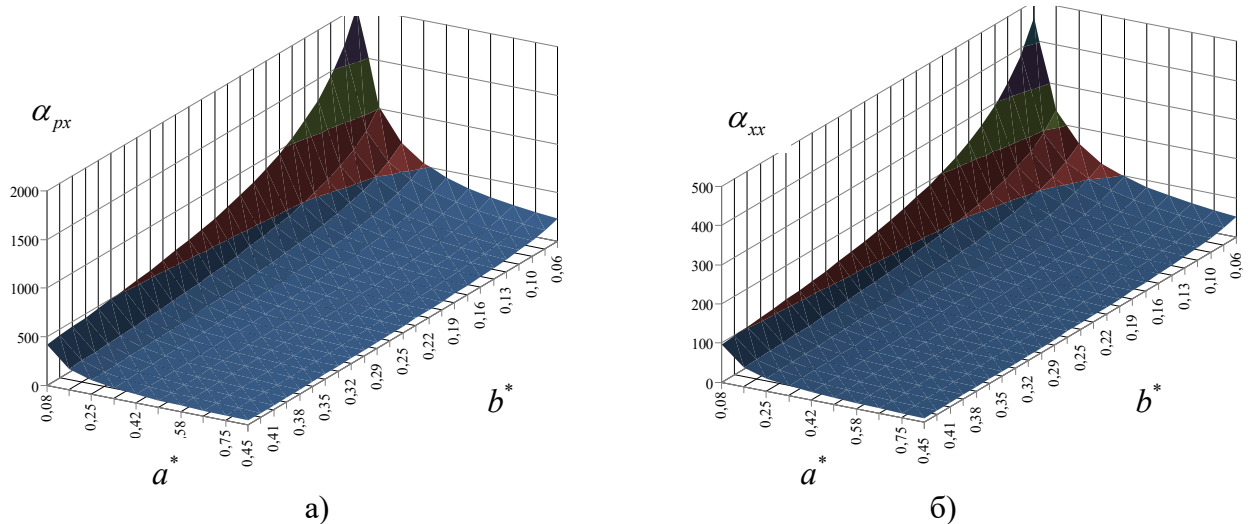


Рис.2.36 – Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи от геометрических факторов: при рабочем (а) и холостом (б) ходе якоря.

При больших значениях a^* и b^* уменьшается сечение магнитопровода, что способствует глубокому насыщению статора и снижению выходных энергетических показателей ЛЭМД [195,217].

При проектировании подобных систем охлаждения (рис.2.37,а) важным

является определение количества $n_{\text{кан}}$ вентиляционных каналов 7 и их длины $l_{\text{кан}}$, когда форма каналов отличается от аксиальной (рис.2.37,б). Для эффективности процесса охлаждения и предотвращения перегрева обмотки ЛЭМД должно соблюдаться условие, при котором объем охлаждающего воздуха $V_{\text{воз}}^{\text{эф}}$, проходящего через вентиляционные каналы за один ход якоря, должен быть не меньше суммарного объема воздуха $\Sigma V_{\text{кан}}$ в аксиальных вентиляционных каналах:

$$V_{\text{воз}}^{\text{эф}} \geq \Sigma V_{\text{кан}}, \quad (2.106)$$

где $\Sigma V_{\text{кан}} = n V_{\text{кан}}$; n – количество каналов; $V_{\text{кан}}$ – объем воздуха в одном аксиальном вентиляционном канале.

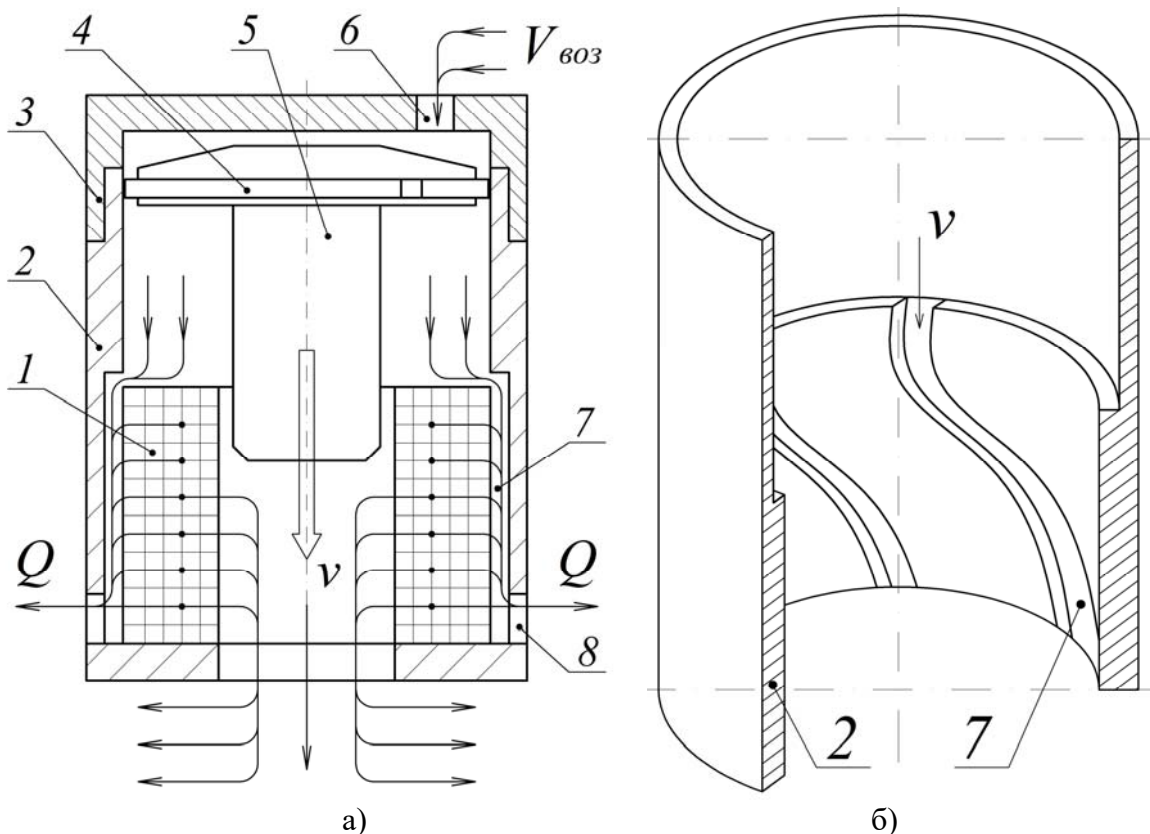


Рис.2.37 – Линейный электромагнитный двигатель с самовентиляцией (а), эскиз статора с криволинейными вентиляционными каналами: 1 – обмотка; 2 – статор; 3 – крышка; 4 – компрессионное кольцо; 5 – комбинированный якорь; 6,8 – вентиляционные отверстия; 7 – вентиляционные каналы.

Для определения значения $V_{\text{кан}}$ пренебрежем кривизной поверхностей и полагаем, что аксиальные вентиляционные каналы выполнены таким образом, что при развертке цилиндрического статора 2 по образующей они будут иметь вид призмы (рис.2.38) [195,210].

Тогда

$$V_{кан} = l_{кан} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}, \quad (2.107)$$

где $l_{кан} = \frac{h_{кан}}{\sin \beta}$ – длина канала; $h_{кан}$ – высота вентиляционного канала; β –

угол наклона вентиляционного канала к продольной оси.

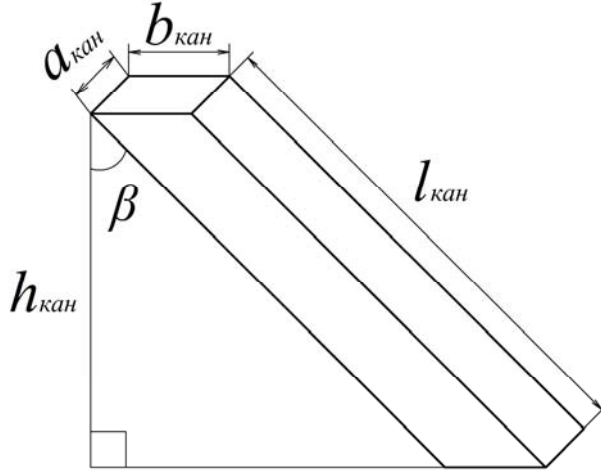


Рис.2.38 – Эскиз призмы вентиляционного канала

Определим объем охлаждающего воздуха $V_{воз}^{эф}$, проходящего через вентиляционные каналы за один ход якоря

$$V_{воз}^{эф} = \left[\frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left(\frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right), \quad (2.108)$$

где h, d – соответственно длина и внутренний диаметр ЛЭМД; $d_{я1}, l_{я1}$ – диаметр и длина цилиндрической части якоря; $d_{я2}, l_{я2}$ – диаметр и длина торцевой части якоря.

Представим (2.106) с учетом (2.107) и (2.108) в виде

$$\left[\frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left(\frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right) \geq n_{кан} \frac{h_{кан}}{\sin \beta} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}. \quad (2.109)$$

Тогда угол наклона β ребер вентиляционного канала к продольной оси

$$\beta = \arcsin \left[\frac{n_{\text{кан}} \cdot h_{\text{кан}} \cdot a_{\text{кан}} \cdot b_{\text{кан}}}{\left(\frac{\pi d^2}{4} (h - h_{\text{кан}}) \right) - \left(\frac{\pi d_{\text{я1}}^2}{4} l_{\text{я1}} + \frac{\pi d_{\text{я2}}^2}{4} l_{\text{я2}} \right)} \right], \quad (2.110)$$

Таким образом, при известных значениях $a_{\text{кан}}$ и $b_{\text{кан}}$, варьированием угла наклона β вентиляционного канала можно добиться эффективного процесса охлаждения обмотки ЛЭМД.

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

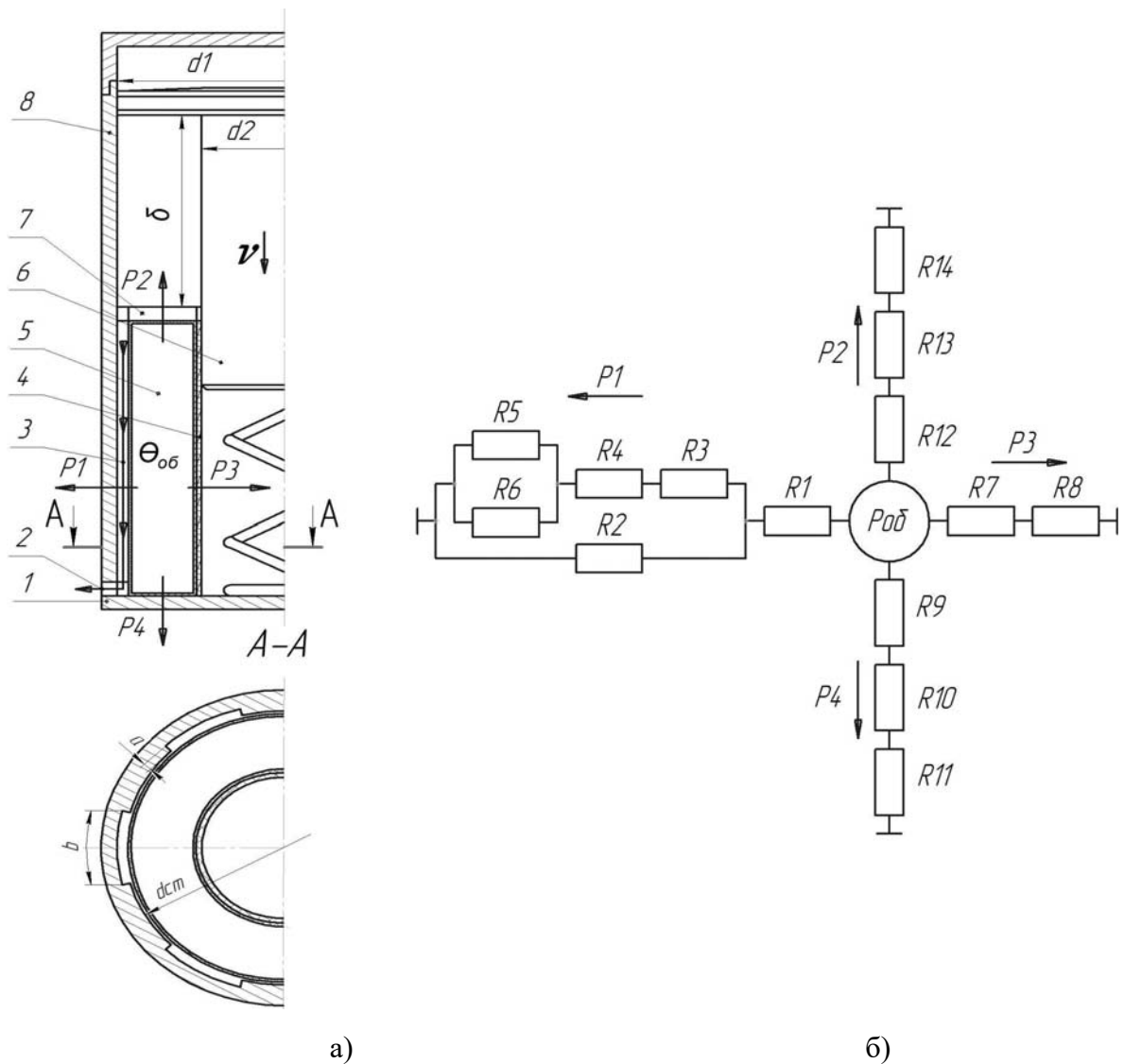


Рис.2.39 – Конструктивная схема линейного электромагнитного двигателя с самовентиляцией (а) и тепловая схема замещения (б)

Тепловая схема замещения ЛЭМД с самовентиляцией (рис.2.39,б) составлена на основе конструктивной схемы (рис.2.39,а) и учитывает тепловые сопротивления теплопроводности (R_1, R_7, R_9, R_{12} – обмотки 5 с изоляцией; R_3 – паразитного зазора между обмоткой 5 и статором 8; R_4 – статора 8; R_8 – изоляционный материала каркаса 4 обмотки 5; R_{10} – нижней крышки 1; R_{13} – прокладки 7) и теплоотдачи (R_2 – с поверхности обмотки 5 в пазах 3; R_5 – с наружной поверхности статора 8; R_6 – с поверхности статора 8 в пазах 3; R_{11} – с поверхности нижней крышки 1; R_{14} – с прокладки 6).

Учитывая, что площадь торцевых частей $S_{тор}$ обмотки мала по сравнению с ее боковой поверхностью $S_{бок}$ ($S_{тор} \leq 0,01 S_{бок}$), потоками P_2 и P_4 можно пренебречь, а наличие изоляционного материала каркаса 4 позволяет пренебречь малым потоком P_3 . Тогда тепловая схема замещения примет вид рис.2.40.

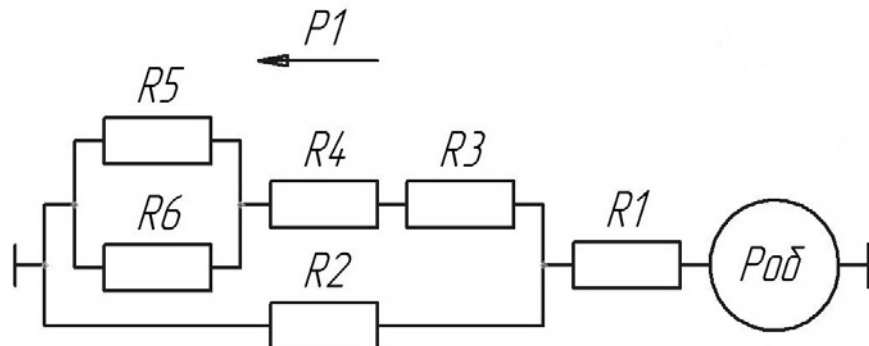


Рис.2.40 – Расчетная тепловая схема замещения ЛЭМД с самовентиляцией

Так как у базисного ЛЭМД отсутствуют вентиляционные каналы, то его тепловая схема замещения с учетом упрощений имеет вид рис.2.41.

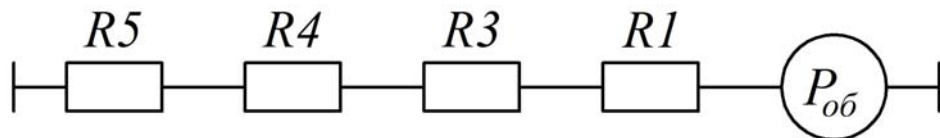


Рис.2.41 – Расчетная тепловая схема замещения базисного ЛЭМД

С учетом последовательного и параллельного соединения сопротивлений определим эквивалентные тепловые сопротивления ЛЭМД с самовентиляцией $R_{экв}^1$ и базисного двигателя $R_{экв}^2$:

$$R_{\text{экв}}^1 = R1 + \frac{R2 \left(R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6} \right)}{R2 + R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6}}, \quad (2.111)$$

$$R_{\text{экв}}^2 = R1 + R3 + R4 + R5. \quad (2.112)$$

Сопротивление теплопроводности определяется свойствами материалов и их размерами [195,217]:

$$\left. \begin{aligned} R1 &= \frac{\delta_{об}}{\lambda_{\text{экв}} S_{об}} \\ R3 &= \frac{\delta_з}{\lambda_з S_з} \\ R4 &= \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст} S_{ст}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.113)$$

где $\delta_{об}$, $\delta_з$, $\delta_{ст}$ – соответственно толщина обмотки, зазора между обмоткой и статором, статора, м; $S_{об}$, $S_з$, $S_{ст}$ – площадь поперечного сечения соответственно обмотки, зазора, статора, м²; $\lambda_з$, $\lambda_{ст}$ – коэффициенты теплопроводности воздуха и статора; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки [217,254].

Сопротивления теплоотдачи определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} R2 &= \frac{1}{\alpha_n S_{об.н}} \\ R5 &= \frac{1}{\alpha_{нар} S_{нар}} \\ R6 &= \frac{1}{\alpha_n S_{ст.н}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.114)$$

где $S_{об.н}$, $S_{ст.н}$, $S_{нар}$ – площадь теплоотдающих поверхностей соответственно обмотки в пазу, статора в пазу и наружная двигателя, м²; α_n , $\alpha_{нар}$ – коэффициенты теплоотдачи в пазу и с наружной поверхности соответственно, Вт/(м²·°C).

Определим площади теплоотдающих поверхностей:

$$S_{об} = \pi d_{об} h_{об}, \quad (2.115)$$

$$S_{cm} = \pi d_{cm} h_{cm}, \quad (2.116)$$

$$S_3 = \pi d_{cm.вн} h_{об} - S_{об}, \quad (2.117)$$

$$S_{об.n} = n h_{об} b \left(\frac{d_{cm}}{d_{cm} + 2a} \right), \quad (2.118)$$

$$S_{cm.n} = n h_{об} (2a + b), \quad (2.119)$$

$$S_{нар} = n d_{нар} h, \quad (2.120)$$

где $d_{об}$, $h_{об}$ – диаметр и длина обмотки; $d_{cm.вн}$, $d_{cm.нар}$ – диаметры статора внутренний и наружный; h_{cm} – длина статора; a , b , n – глубина, ширина и количество вентиляционных каналов (рис.2.35).

Обмотка ЛЭМД в тепловом отношении представляет собой гетерогенное тело со сложным распределением коэффициента теплопроводности λ . Однако при расчете эту гетерогенность не учитывают, приписывая обмотке некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$. Он зависит от типа укладки, коэффициента заполнения k_3 , коэффициента пропитки k_n , коэффициента теплопроводности изоляции провода λ_u , коэффициента теплопроводности пропиточного состава λ_n , диаметра провода d_n и средней температуры обмотки θ_{cp} [217,254]. Для наглядности расчетов можно воспользоваться упрощенной формулой, например, для непропитанных катушек, намотанных круглым медным проводом при шахматной укладке [30,254]:

$$\lambda_{экв} = 2,18 \sqrt{\lambda_u \lambda_n \left(\frac{d_n}{\delta_u} + 1 \right)} - 1,33 \lambda_n, \quad (2.121)$$

где λ_u , – теплопроводность изоляции, Вт/(м·°С); d_n – диаметр голого провода, м; δ_u – толщина изоляции, м.

Для определения коэффициента теплоотдачи α_n в вентиляционном канале воспользуемся выражением

$$\alpha_n = 0,5(\alpha_{px} + \alpha_{xx}), \quad (2.122)$$

где α_{px} , α_{xx} – коэффициенты теплоотдачи в вентиляционных каналах при рабочем и холостом ходах якоря, которые определяются по (2.104) и (2.105)

соответственно.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{нар}$ свободной конвекцией с наружной поверхности двигателя в неограниченном пространстве можно вычислить по упрощенной формуле [118,254]:

$$\alpha_{нар} = Nu_m \frac{\lambda_{\epsilon}}{L_{опр}}, \quad (2.123)$$

где $L_{опр}$ – характерный геометрический размер, м; Nu_m – критерий Нуссельта.

$$Nu_m = C [Gr Pr]_m^n, \quad (2.124)$$

$$Gr = \frac{\beta g L^3 (\theta - \theta_0)}{\nu^2}, \quad (2.125)$$

$$Pr = \frac{\mu g c_p}{\lambda_{\epsilon}}, \quad (2.126)$$

где β – коэффициент объемного расширения ($\beta = 1/(273 + \theta_m)$; $\theta_m = (\theta + \theta_0)/2$), K^{-1} ; g – ускорение силы тяжести, $м/с^2$; θ , θ_0 – температура поверхности и температура окружающей среды соответственно, $^{\circ}C$; ν – кинематическая вязкость воздуха, $м^2/с$; μ – динамическая вязкость воздуха, $Н \cdot с/м^2$; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $Дж/(кг \cdot ^{\circ}C)$.

Индекс m у критериев означает, что при вычислении соответствующего критерия физические параметры необходимо вычислять при температуре с тем же индексом. Величины C и n определяются по справочным таблицам [30,118,254].

Предварительные расчеты позволили определить значения $R_{\epsilon кв}^1$ и $R_{\epsilon кв}^2$:

$$\frac{R_{\epsilon кв}^2 - R_{\epsilon кв}^1}{R_{\epsilon кв}^2} \cdot 100\% \approx 35\%. \quad (2.127)$$

Таким образом, применение в ЛЭМД-приводе самовентилиации эквивалентно снижению теплового сопротивления двигателя на 35 %, что увеличит продолжительность работы при форсированном потреблении электроэнергии.

Для последующих рассуждений и оценки тепловых и гидравлических процессов, протекающих в ЛЭМД (рис.2.34), воспользуемся методикой, представленной в [5,75,254]. Потери мощности ΔP (2.41) в обмотке ЛЭМД и отводимые $P_{отв}$ при помощи самовентиляции определяются по выражению:

$$P_{отв} = Q_в c \rho \theta_{\max}, \quad (2.128)$$

где $Q_в$, c , ρ – расход, удельная теплоемкость и плотность охлаждающего воздуха; $\theta_{\max}$ – допустимое превышение температуры охлаждающего воздуха для данного класса нагревостойкости изоляции машины.

Из [46,254] значение $Q_в$ определяется по выражению:

$$Q_в = \sqrt{\frac{p_n}{z_m}}, \quad (2.129)$$

где p_n – давления в системы охлаждения двигателя; z_m – суммарное гидравлическое сопротивление ЛЭМД.

Давление p_n , создаваемое комбинированным якорем с компрессионным кольцом на рабочем ходе, определим как отношение осевого усилия якоря $F_я$ к площади торцевой части обмотки, обдуваемой воздушным потоком (рис.2.34):

$$p_n = \frac{4F_я}{\pi(d_1^2 - d_2^2)}, \quad (2.130)$$

d_1 – внутренний диаметр статора в надобмоточном пространстве, м; d_2 – диаметр якоря, м.

С учетом (2.129) и (2.130) выражение (2.128) примет вид:

$$P_{отв} = c \rho \theta_{\max} \sqrt{\frac{4F_я}{z_m \pi(d_1^2 - d_2^2)}}. \quad (2.131)$$

Определим суммарное гидравлическое сопротивление вентиляционного канала z_m [46]. При движении охладителя внутри n -го количества аксиальных каналов он преодолевает в каждом из них местное сопротивление z_2 при входе, сопротивление по длине z_3 при движении вдоль канала, местное со-

противление z_4 на выходе из него и местное сопротивление z_5 при перемещении из электродвигателя в окружающую среду (рис.2.42).

Сопротивления, преодолеваемые охладителем в аксиальном канале, соединяются последовательно, поэтому в соответствии с [46] суммарное сопротивление $z_{\text{кан}}$ будет равно [5,112]:

$$z_{\text{кан}} = z_2 + z_3 + z_4 + z_5 = \frac{\rho}{4F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_1} \right) + \frac{\xi_{\text{к}} \rho l_{\text{к}}}{2F_2^2 d_{\text{г.к}}} + \frac{\rho}{2F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_3} \right)^2 + \frac{\zeta_{\text{в}} \rho}{2F_3^2};$$

$$z_{\text{кан}} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{1}{2F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_1} \right) + \frac{\xi_{\text{к}} l_{\text{к}}}{F_2^2 d_{\text{г.к}}} + \frac{1}{F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_3} \right)^2 + \frac{\zeta_{\text{в}}}{F_3^2} \right], \quad (2.132)$$

где F_1 , F_2 , F_3 – площади проходных сечений вентиляционных каналов (рис.2.42,а); $l_{\text{к}}$ и $d_{\text{г.к}}$ – длина и гидравлический диаметр аксиального канала; $\xi_{\text{к}}$ – коэффициент путевых потерь на трение в канале; $\zeta_{\text{в}}$ – коэффициент местных потерь трения на выходе из двигателя [5,46,112].

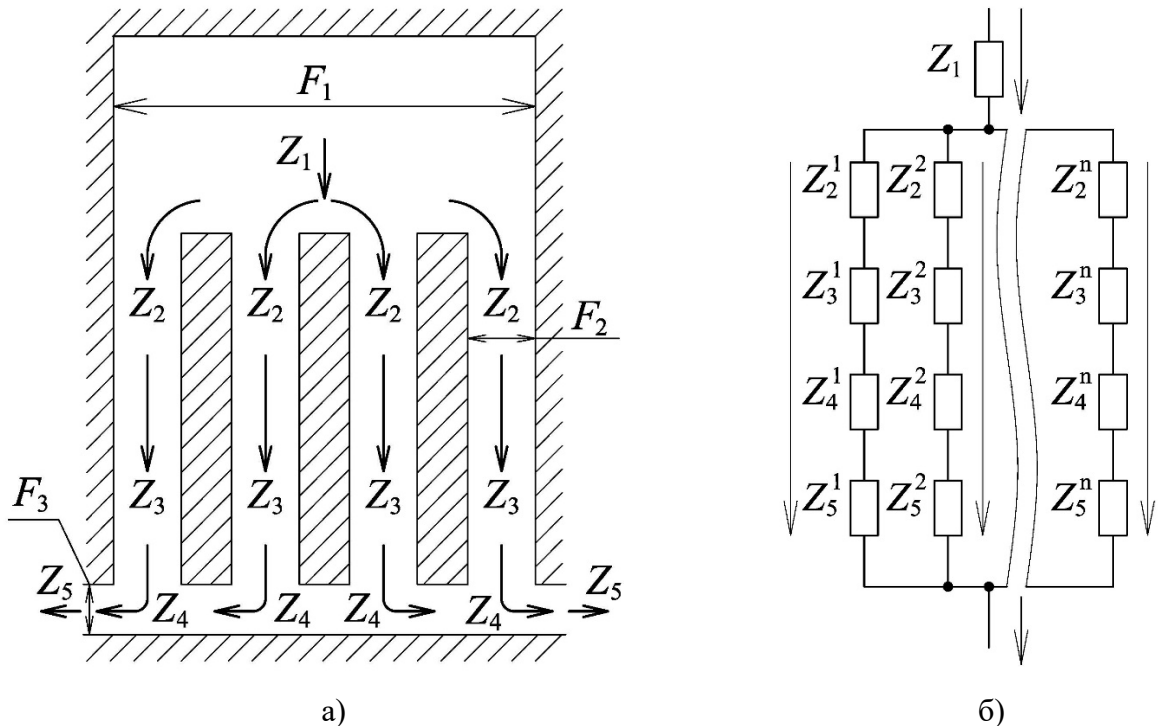


Рис.2.42 – Схемы вентиляционных каналов ЛЭМД: а – упрощенное изображение вентиляционного канала; б – эквивалентная гидравлическая схема.

Определим гидравлический или эквивалентный диаметр аксиального канала $d_{\text{г.к}}$ [46,254]:

$$d_{г.к} = \frac{4F}{\Pi}, \quad (2.133)$$

где F – площадь поперечного сечения канала, м²; Π – длина периметра поперечного сечения канала, м.

Так как охлаждающие каналы имеют прямоугольный профиль сечения, то (2.133) преобразуем:

$$d_{г.к} = \frac{2a_{к}b_{к}}{a_{к} + b_{к}}, \quad (2.134)$$

где $a_{к}$ – глубина паза, м; $b_{к}$ – ширина паза по дуге, м.

Площади проходных сечений вентиляционных каналов определим по выражениям:

$$F_1 = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2), \quad (2.135)$$

$$F_2 = a_{к}b_{к}, \quad (2.136)$$

$$F_3 = \frac{\pi d_3^2}{4}, \quad (2.137)$$

d_3 – диаметр выпускных отверстий на боковой поверхности корпуса ЛЭМД.

Полагая сопротивление каналов одинаковым, определим общее гидравлическое сопротивление вентиляционного тракта $z_{м}$:

$$z_{м} = z_1 + \frac{z_{кан}}{n^2}, \quad (2.138)$$

где z_1 – путевое сопротивление при движении охладителя внутри статора в надобмоточном пространстве.

$$z_1 = \frac{\xi_c \rho \delta}{2F_1^2 d_{г.с}}, \quad (2.139)$$

где ξ_c – коэффициент путевых потерь на трение внутри статора; δ – величина рабочего хода якоря, м; $d_{г.с}$ – гидравлический диаметр внутренней поверхности между якорем и статором в надобмоточном пространстве, м.

Внутренняя надобмоточная поверхность между якорем и статором имеет форму кольца, поэтому в соответствии с (2.133) гидравлический диаметр $d_{г.с}$:

$$d_{г.с} = d_1 - d_2. \quad (2.140)$$

Общее гидравлическое сопротивление вентиляционного канала ЛЭМД z_M найдем по выражению:

$$z_M = \frac{\rho}{2} \cdot \left\{ \frac{\xi_c \delta}{F_1^2 d_{г.с}} + \frac{1}{n^2} \left[\frac{1}{2F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_1} \right) + \frac{\xi_k l_k}{F_2^2 d_{г.к}} + \frac{1}{F_2^2} \left(1 - \frac{F_2}{F_3} \right)^2 + \frac{\zeta_B}{F_3^2} \right] \right\}. \quad (2.141)$$

На рис.2.43, для примера, представлена зависимость отводимой мощности $P_{отв}$ от длины l_k при изменении гидравлического диаметра $d_{г.к}$ [5,112].

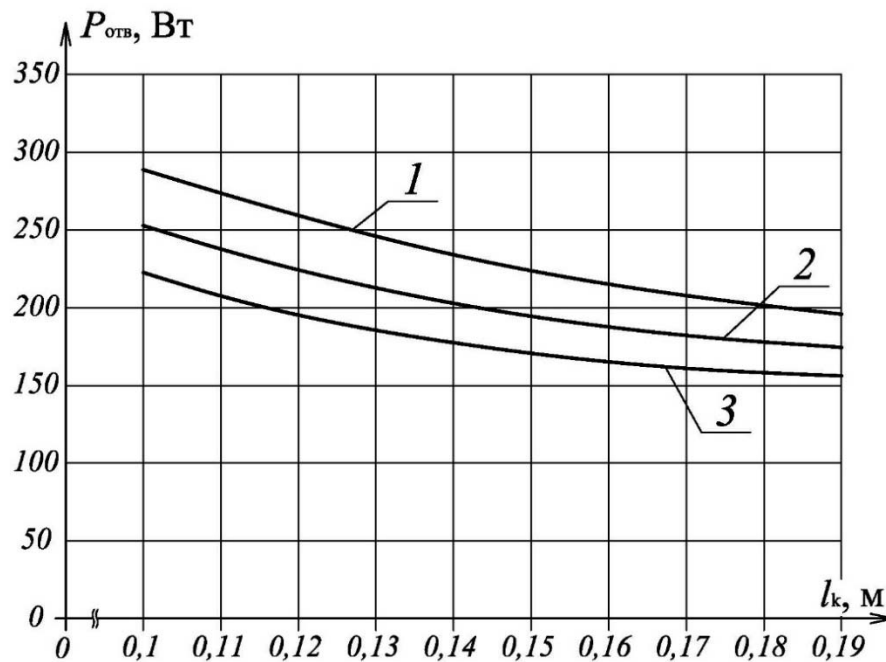


Рис.2.43 – Зависимость отводимой мощности от геометрических параметров вентиляционного канала: 1 – $d_{г.к}=0,0049$; 2 – $d_{г.к}=0,0039$; 3 – $d_{г.к}=0,0029$.

Максимальное значение $P_{отв}$ достигается при уменьшении длины канала l_k и увеличении его гидравлического диаметра $d_{г.к}$. Однако при больших значениях $d_{г.к}$ уменьшается сечение магнитопривода, что способствует глубокому насыщению статора и снижению выходных энергетических показателей ЛЭМД-привода [5,112].

2.4.2.5 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с принудительной вентиляцией

Применение систем принудительного охлаждения неизбежно приводит к усложнению конструкции линейного электромагнитного двигателя. Однако

в ряде случаев, когда работа ЛЭМД сопровождается большими потерями мощности и рассмотренные способы охлаждения не позволяют отвести нужное количество теплоты, обеспечение заданного температурного режима работы электромагнитного двигателя приводит к увеличению временных интервалов между рабочими циклами, что отрицательно сказывается на производительности оборудования с ЛЭМД-приводом. Таким образом, для увеличения продолжительности работы электромагнитных машин при форсированном потреблении электроэнергии использование принудительной вентиляции ЛЭМД экономически целесообразно и оправдано [113,116].

Использование продуваемых ЛЭМД (рис.2.30,б) в приводе машин, по сравнению с обдуваемыми двигателями (рис.2.30,в), уменьшает тепловое сопротивление стенки корпуса R_{λ} и увеличивает количество отводимой теплоты при неизменных технических характеристиках вентилятора [116,254].

На рис.2.44 представлена конструктивно-технологическая схема принудительной вентиляции ЛЭМД, основными элементами которой являются: корпус 1, крышки корпуса 2, якорь 3, обмотка статора 4, выпускное окно 5 и нагнетательный вентилятор с индивидуальным приводом 6. На внутренней поверхности корпуса 1 выполнены радиальные вентиляционные каналы 7, продуваемые вентилятором 6 через выпускное окно 5.

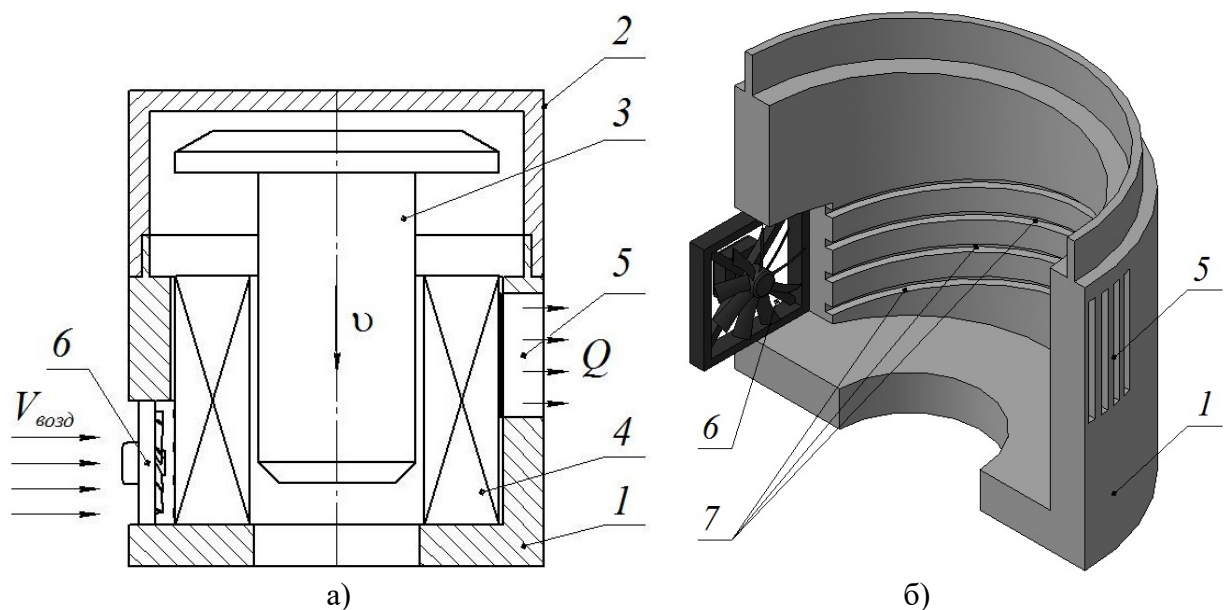


Рис.2.44 – ЛЭМД с принудительной вентиляцией: а – конструктивно-технологическая схема; б – аксонометрическая модель корпуса ЛЭМД/

Рабочий процесс в соответствии с предложенной схемой протекает следующим образом. При подключении обмотки 4 к источнику питания якорь 3 под действием электромагнитной силы совершает рабочий ход, а затем под действием пружины возвращается обратно. Вентилятор 6 создает воздушный поток, который перемещается по радиальным каналам 7, охлаждая обмотку 6, и выходит наружу через выпускное окно 5. Вентилятор имеет отдельный от ЛЭМД привод, поэтому действует как на рабочем, так и на холостом ходе якоря.

Радиальные каналы выполнены спиральными по всей длине внутренней цилиндрической поверхности статора, что позволяет существенно увеличить площадь обдуваемой поверхности статора. При этом эффективность теплоотдачи в каналах будет зависеть от режимных параметров работы системы вентиляции, например, скорости движения охладителя в каналах и давления в системе.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{кан}}$ в радиальных каналах определяется по выражению [118,254]:

$$\alpha_{\text{нар}} = Nu \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{экв}}}, \quad (2.142)$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и теплопроводности; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха Вт/м·°С; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр радиального канала, м.

Охлаждающие каналы имеют прямоугольное сечение, поэтому эквивалентный или гидравлический диаметр [46,254]:

$$d_{\text{г.к}} = \frac{2a_{\text{к}}b_{\text{к}}}{a_{\text{к}} + b_{\text{к}}}, \quad (2.143)$$

где $a_{\text{к}}$ – глубина паза, м; $b_{\text{к}}$ – ширина паза по дуге, м.

Критерий Нуссельта при движении газов в каналах определяется [118]:

– для ламинарного режима:

$$Nu_m = 0,146 Re^{0,33} Gr^{0,1}; \quad (2.144)$$

– для переходного режима:

$$Nu_m = 0,86 K_0; \quad (2.145)$$

– для турбулентного режима:

$$Nu_m = 0,018 Re^{0,8}, \quad (2.146)$$

где Re – число Рейнольдса; K_0 – комплексный коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса [118,254].

Число Рейнольдса для перемещаемого в радиальных каналах охладителя:

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d_{\text{экв}}}{\nu}, \quad (2.147)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения воздуха в охлаждающем канале, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с [116,118].

Для ламинарного режима движения охладителя в каналах $Re \leq 2300$; для переходного – $2300 < Re < 10^4$; для турбулентного – $Re \geq 10^4$ [118].

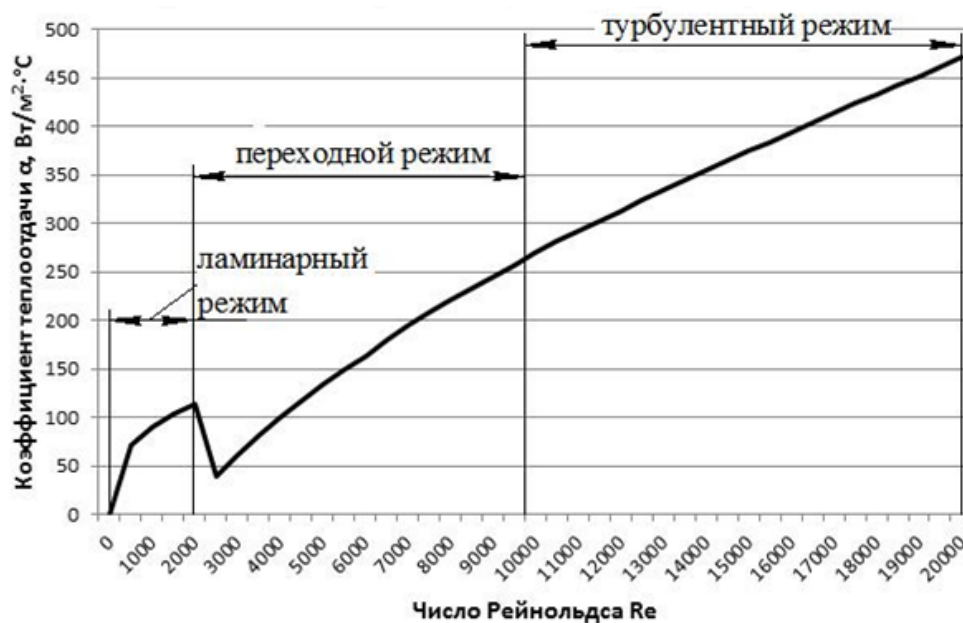


Рис.2.45 – График зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{кан}}$ в вентиляционных каналах от числа Рейнольдса

Среднюю скорость охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах определим как отношение требуемого расхода охладителя Q_n к площади поперечного сечения канала F_k [116,254]:

$$v_{в.ср} = \frac{Q_n}{F_k}. \quad (2.148)$$

Таким образом, число Рейнольдса, выраженное через требуемый расход газа Q_n :

$$Re = \frac{2Q_n}{\nu(a_k + b_k)}. \quad (2.149)$$

Для выбора оптимального режима движения охладителя в каналах графически отобразим зависимость коэффициента теплоотдачи в радиальных каналах $\alpha_{кан}$ от значений числа Рейнольдса, с учетом (2.144)-(2.146) (рис.2.45).

Анализ кривой диаграммы показывает, что при изменении критерия Re теплоотдача наиболее интенсивно возрастает при ламинарном режиме движения охладителя. Начало ламинарного ($0 < Re < 500$) и переходного ($2300 < Re < 4000$) режимов характеризуется сравнительно низким коэффициентом $\alpha_{кан}$, поэтому для этих интервалов значения критерия Рейнольдса процесс теплоотдачи в каналах будет менее интенсивным, что скажется на эффективности системы охлаждения в целом. Таким образом, наиболее благоприятными, с точки зрения интенсивности теплоотдачи, будут значения критерия Рейнольдса $Re = 500 \dots 2300, 4000 \dots 10^5$. Это необходимо учитывать при подборе вентилятора по требуемому расходу охлаждающей среды Q_n [116].

2.4.2.6 Оценка эффективности охлаждения ЛЭМД в приводе машин

Для оценки эффективности способов охлаждения ЛЭМД примем набор коэффициентов [30,254], представленный тремя группами: коэффициентами эффективности способа охлаждения, коэффициентами свойств конструкции системы охлаждения, коэффициентами экономичности охлаждения.

Коэффициенты интенсивности охлаждения $k_{инт.охл}$ и использования охладителя $k_{исп.охл}$ (первая группа) [30,254]:

$$k_{инт.охл} = \frac{\alpha P_o}{Q_{max} \theta}, \quad (2.150)$$

$$k_{исп.охл} = \frac{Q_{min}}{Q_{max}}, \quad (2.151)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, P_o – потери в обмотке ЛЭМД, θ – подогрев охладителя, Q_{min} , Q_{max} – минимальный и максимальный расходы охладителя [30,254].

Коэффициент α задается суммой коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{из}$ и конвекцией $\alpha_{кон}$ [30,116,254]. Так как $\alpha_{из} \ll \alpha_{кон}$, полагаем

$$\alpha = \alpha_{кон} = k_n \sqrt[4]{\frac{\theta_k - \theta_{окр}}{L}}, \quad (2.152)$$

где k_n – поправочный коэффициент; θ_k – температура корпуса, $\theta_{окр}$ – температура окружающей среды; L – базисный размер.

Подогрев охладителя θ определим:

$$\theta = k \frac{\sum P}{2C_o \rho_o Q}, \quad (2.153)$$

где $\sum P = \Delta P_m + \Delta P_c$ – сумма потерь в ЛЭМД, ΔP_m – потери в меди; ΔP_c – потери в стали, C_o и ρ_o – теплоемкость и плотность охладителя соответственно.

Расход воздуха для ЛЭМД с самовентиляцией [116]:

$$Q_c = \frac{\pi \delta}{4 t_p} (d_c^2 - d_{я}^2), \quad (2.154)$$

где δ – величина рабочего хода якоря, м; t_p – продолжительность одного рабочего цикла ЛЭМД, с; d_c – внутренний диаметр статора в надобмоточном пространстве, м; $d_{я}$ – диаметр якоря.

Коэффициенты равномерности нагрева $k_{p.н}$, близости теплостока $k_{б.мс}$ и использования поверхности $k_{исп.нов}$ (вторая группа):

$$k_{p.n} = \frac{\theta_{cp}}{\theta_{max}}; \quad (2.155)$$

$$k_{\theta.mc} = \frac{R_{\alpha}}{R_{\alpha} + R_{\lambda}}; \quad (2.156)$$

$$k_{исп.нов} = \frac{S_{охл}}{S_a}, \quad (2.157)$$

где θ_{cp} и θ_{max} – средняя и максимальная температуры обмотки; R_{λ} и R_{α} – термические сопротивления при передаче теплоты теплопроводностью и конвекцией соответственно [30,254]; $S_{охл}$ и S_a – площади охлаждаемой поверхности и поверхности активных частей.

Площадь охлаждаемой поверхности $S_{охл1}$ при отсутствии дополнительного охлаждения принимается по внешней поверхности ЛЭМД, которая условно представляется суммой площадей боковой поверхности электродвигателя, его верхней и нижней торцевых поверхностей корпуса [116].

$$S_{охл1} = 2\pi R(h + R), \quad (2.158)$$

где R и h – внешний радиус и высота ЛЭМД.

Для оребренной поверхности корпуса ЛЭМД $S_{охл2}$:

$$S_{охл2} = 2\pi R(h + R)k_F, \quad (2.159)$$

где k_F – коэффициент оребрения, $k_F=2,5$ [195].

Для ЛЭМД с искусственным охлаждением следует учесть показатель $S_{охл3}$, определяемый:

$$S_{охл3} = 2\pi R(h + R) + S_{дон}, \quad (2.160)$$

где $S_{дон}$ – площадь внутренней поверхности статора и обмотки, охлаждаемая искусственно; определяется исходя из способа искусственного охлаждения и конструктивного исполнения охлаждающей системы.

Энергетический $k_{\varepsilon\theta}$ и массовый $k_{\varepsilon m}$ коэффициенты экономичности (третья группа):

$$k_{\varepsilon\theta} = \frac{P_o}{P_o + P_{охл}}; \quad (2.161)$$

$$k_{эм} = \frac{M_o}{M_o + M_{охл}}, \quad (2.162)$$

где $P_{охл}$ – потери мощности на охлаждение; M_o – масса обмотки ЛЭМД, $M_{охл}$ – масса системы охлаждения.

Совокупность представленных коэффициентов позволяет детально охарактеризовать любой способ охлаждения ЛЭМД и оценить его эффективность при учете конструктивных и режимных параметров линейных электромагнитных двигателей для привода машин.

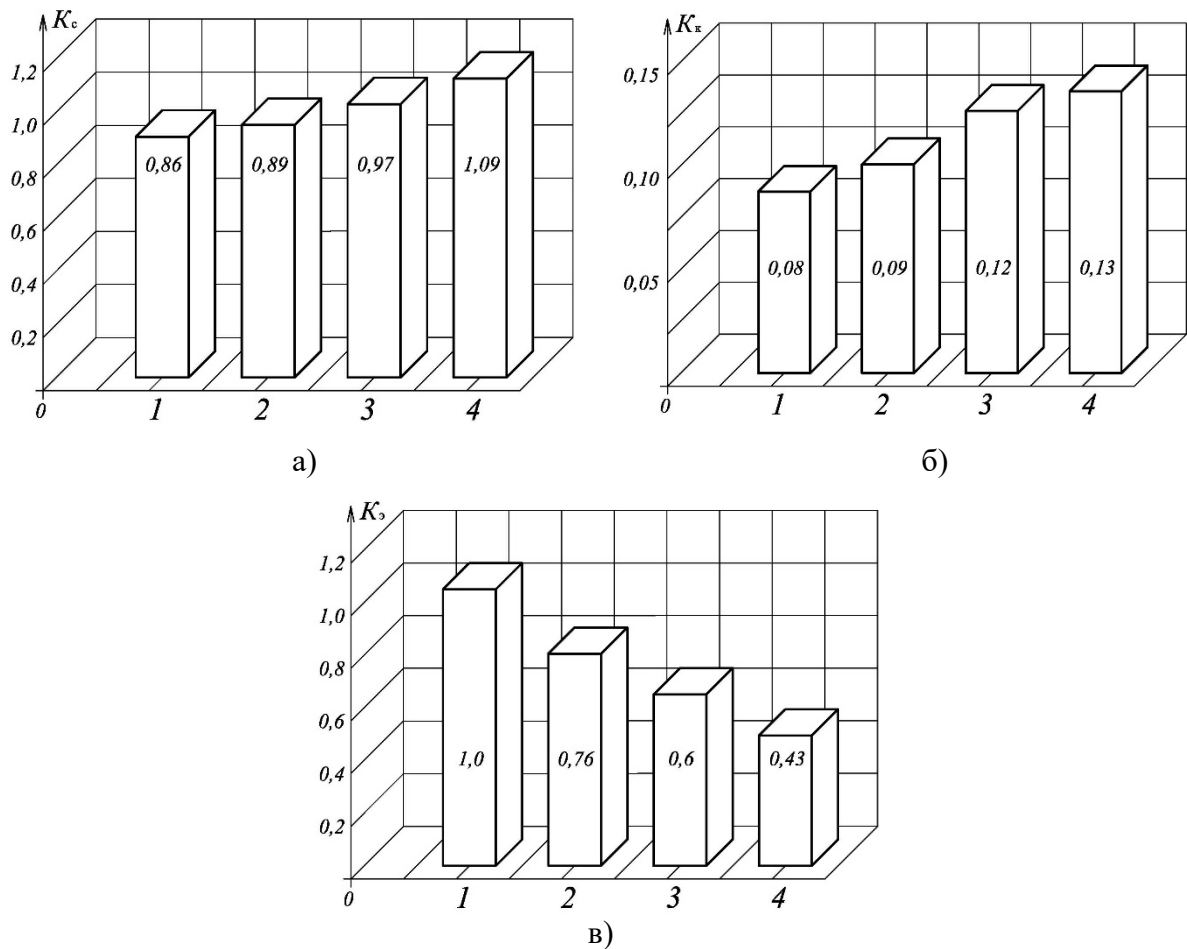


Рис.2.46 – Гистограммы обобщенных критериев оценки: эффективности способов охлаждения K_c (а), качества конструкции системы охлаждения K_k (б), экономичности охлаждения двигателя $K_э$ (в): 1 – контроль; 2 – оребрение; 3 – само-вентиляция; 4 – принудительное охлаждение.

В заключение оценим эффективность различных способов охлаждения ЛЭМД, используя «обобщенные критерии», предложенные в [30,254]:

– эффективность способа охлаждения

$$K_c = k_{инт.охл} k_{исп.охл}; \quad (2.163)$$

- качество конструкции системы охлаждения

$$K_K = k_{p.n} k_{б.мс} k_{исп.пов} ; \quad (2.164)$$

- экономичность охлаждения машины

$$K_Э = k_{ЭЭ} \cdot k_{ЭМ}. \quad (2.165)$$

При этом базисным будем полагать ЛЭМД без увеличенной теплоотдающей поверхности, самовентиляции и дополнительных охлаждающих вентиляторов. Результаты оценки представлены в виде гистограмм (рис.2.46) [114].

Сопоставление показателей рис.2.46 показывает, что наиболее эффективным является принудительное охлаждение ЛЭМД, хотя этот способ усложняет и удорожает конструкцию. Увеличение теплоотдающей поверхности ЛЭМД представляется здесь более экономичным, но обеспечивает сравнительно невысокие показатели эффективности системы охлаждения.

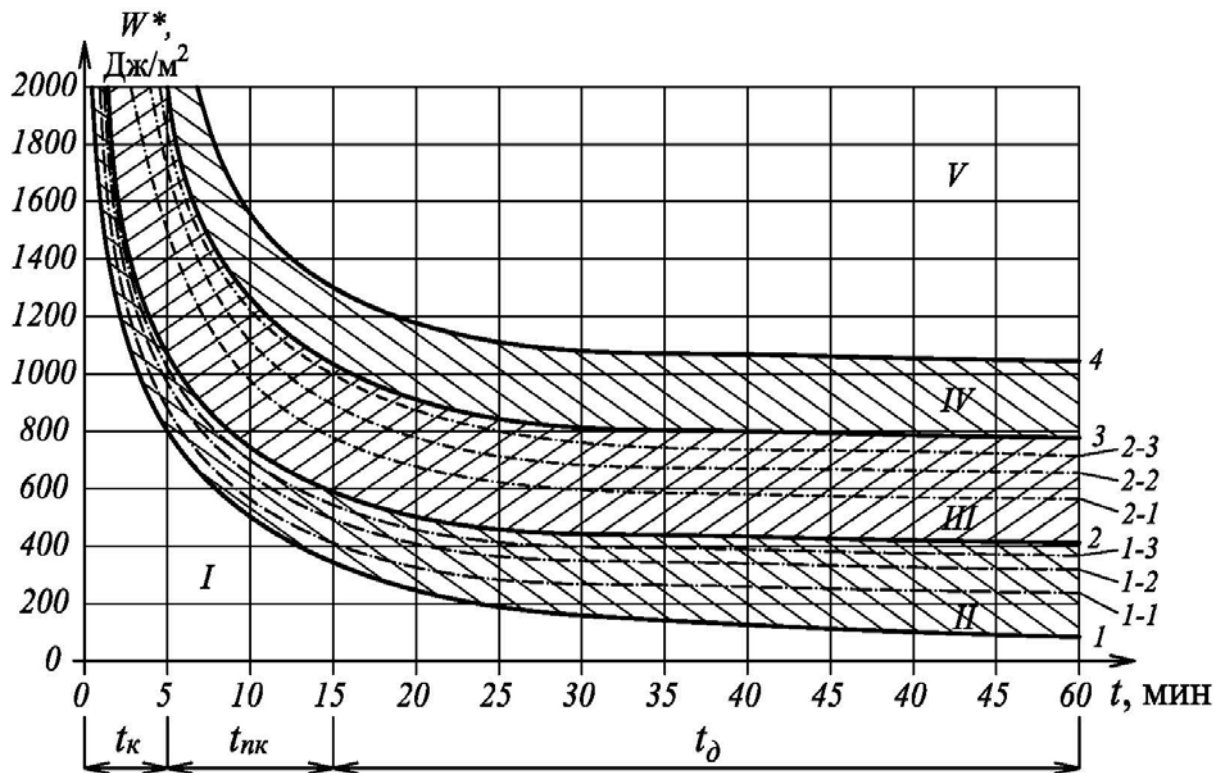


Рис.2.47 – Диаграмма для выбора системы охлаждения электромагнитной машины с ЛЭМД.

Результаты исследования стационарных и нестационарных тепловых процессов в ЛЭМД представлены диаграммой (рис.2.47), позволяющей оперативно осуществлять выбор рационального исполнения системы охлажде-

ния, что упрощает проектирование конструкций ударных и безударных электромагнитных машин.

На выбор рациональной системы охлаждения влияют режим работы ЛЭМД-привода: кратковременный t_k , повторно-кратковременный $t_{нк}$, продолжительный t_d ; потребление электрической энергии и площадь теплоотдающей поверхности ЛЭМД. Кривые 1...4 на диаграмме рис.2.47 делят совокупность значений на подобласти I – V, определяющие предпочтительность системы охлаждения:

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

2.5 Конкурентные конструктивные схемы и показатели ЛЭМД для приводов машин АПК

Двухзазорные цилиндрические электромеханические преобразователи электромагнитного типа – линейные электромагнитные двигатели с комбинированным якорем – неоднократно использовались при реализации операций и процессов и рассмотрены, например, в работах [131,149,195,196]. Область эффективного применения таких двигателей и приводов существенно ограничена тем обстоятельством, что здесь реализуются возвратно-поступательные движения при ограниченном ходе якоря.

В развитие такой конструктивной схемы рассмотрим линейный электромагнитный двигатель, в магнитной системе которого имеется сквозной осевой канал (рис.2.48).

Существенным отличительным признаком конструкции ЛЭМД ударной машины, например, для забивки продольно-неустойчивых стержней [13,178], является сквозной осевой канал и интегрированный в конструкцию и переставляемый по стержню зажимной механизм, позволяющий предотвратить неустойчивость.

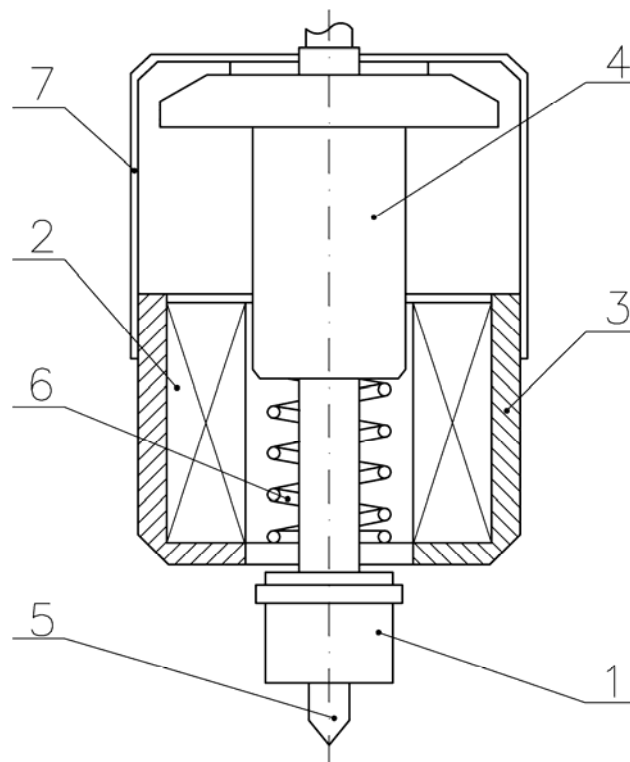


Рис.2.48 – Конструктивная схема ЛЭМД с осевым каналом: 1 – наковальня; 2 – обмотка; 3 – корпус-статор; 4 – ярмо; 5 – забиваемый стержень; 6 – возвратная пружина; 7 – направляющий корпус.

Для выбранной магнитной системы эти особенности предопределяют изменения конструкции ЛЭМД, когда отдельные важные элементы двигателя либо исключаются вовсе и вместо них вводятся новые необходимые узлы, либо существенно изменяется их прежнее размещение в машине. Поскольку вновь вводимые или изменившие свое прежнее расположение элементы являются не только конструктивными для ударной машины, но и частью магнитной цепи ЛЭМД, то при работе они будут влиять на перераспределение

магнитных потоков в двигателе и показатели машины. Поэтому важно так преобразовать известную конструктивную схему ЛЭМД УМ, чтобы негативное влияние отмеченных факторов было минимальным.

Эти особенности учтены в предлагаемой конструкции цилиндрического ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами, представленной на рис.2.48. Подробное описание конструкции и единичного цикла срабатывания двигателя приведены в работах [195,196].

В ЛЭМД ударных машин необходимо обеспечить не только кинетическую энергию в момент удара, но и повысить быстродействие двигателя. Это позволяет увеличить частоту ходов якоря n и, следовательно, ударную мощность машины $P_{y\delta} = A_{y\delta}n$. Значение n зависит от нескольких факторов: массы якоря m , силовой характеристики возвратной пружины, формы тяговой характеристики $F_m(\delta)$ ЛЭМД. При этом масса якоря является определяющей величиной, зависящей от назначения машины. Опыт проектирования и эксплуатации электромагнитных приводов с упругими возвратными элементами [195,196,230], показывает, что для ЛЭМД переносных машин целесообразно использовать цилиндрические витые пружины сжатия [149,196]. Такие пружины обладают малой массой, высокой надежностью, они удачно komponуются в конструкцию двигателя, просто рассчитываются.

Тяговая характеристика ЛЭМД $F_m(\delta)$ имеет нелинейный гиперболический характер (рис.2.49, кривая 1); электромагнитное усилие $F_{m.k}$ двигателя при малых зазорах δ_k резко возрастает и во много раз превосходит начальное $F_{m.k} \gg F_{m.n}$. Значительная величина $F_{m.k}$ при малых зазорах δ способствует задержке якоря (его «залипанию») после срабатывания ЛЭМД. Результатом этого процесса является увеличенное время возврата $t_{возв}$ якоря, что ведет к уменьшению частоты ходов двигателя [83,195,196,230]

$$n = 1 / (t_{ср.аб} + t_{возв}). \quad (2.166)$$

Показанная на рис.2.49 характерная кривая 1 тягового усилия $F_m = f(\delta)$ для ЛЭМД ударной машины не является рациональной. С целью повышения

ударной мощности $P_{y\partial}$ следует изменить характеристику $F_m=f(\delta)$ так, чтобы снизить $F_{m.k}$ (рис.2.49 кривая 2). Это способствует уменьшению времени возврата $t_{возв}$ якоря и повышению ударной мощности

$$P_{y\partial}=A_{y\partial}/(t_{ср\partial\delta}+t_{возв}). \quad (2.166)$$

Для получения требуемой формы тяговой характеристики необходимо увеличить длину якоря на $\Delta l_{я}$, что приведет к снижению тягового усилия $F_{эк}$ в области малых зазоров δ [195,196].

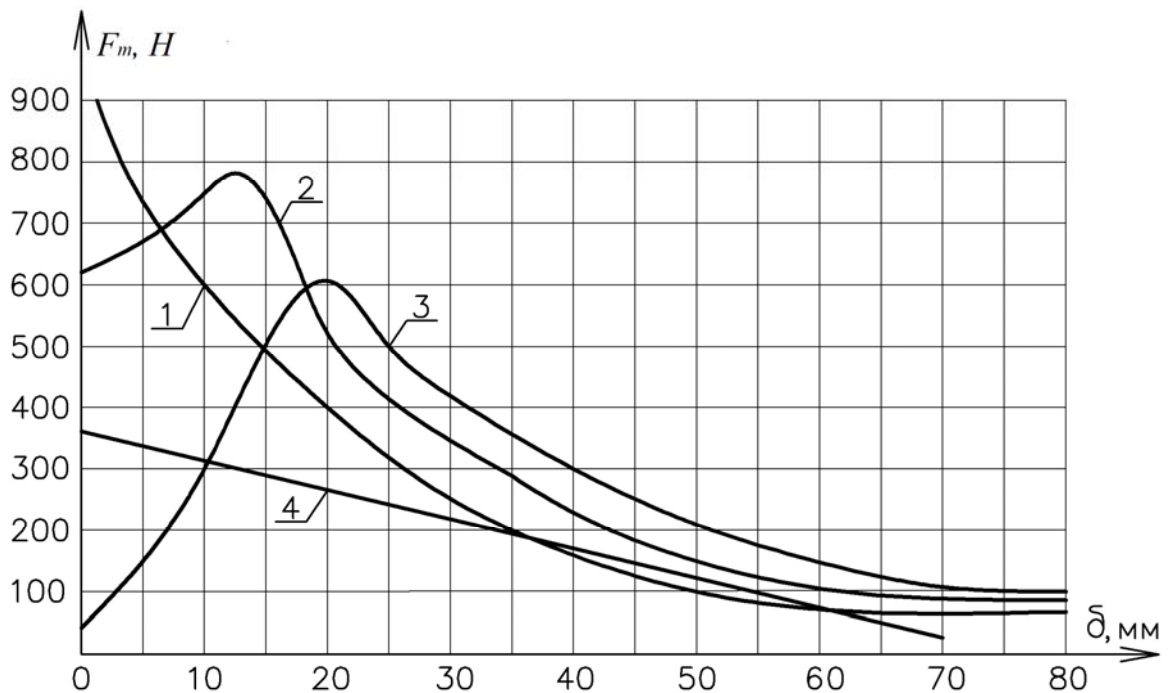


Рис.2.49 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД.

Для количественной оценки влияния $\Delta l_{я}$ на показатели ЛЭМД – начальное $F_{m.n}$, максимальное $F_{m.m}$ усилие, значение A_u – получены и обработаны силовые статические тяговые характеристики двигателя с $\Delta l_{я}=0$; $\Delta l_{я}=0,2\delta$; $\Delta l_{я}=0,3\delta$ с помощью модели (рис.2.7).

На рис.2.49 приведены статические тяговые характеристики исследованных магнитных систем двигателей. При сравнении за базисный принят ЛЭМД с $\Delta l_{я}=0$ (кривая 1), у которого максимальное усилие достигается при $\delta=0$, что в динамике приводит к временному «залипанию» бойка и уменьшению частоты ходов двигателя.

В случае чрезмерно большой величины $\Delta l_{я} > 0,3\delta$ наблюдается существенное снижение максимального усилия $F_{т.м}$ при малых зазорах (рис.2.49, кривая 3), что объясняется перераспределением составляющих тягового усилия.

ЛЭМД с величиной $\Delta l_{я} = 0,2\delta$ развивает большее максимальное усилие (рис.2.49, кривая 2), которое в момент удара уменьшается на 20 – 30% по сравнению с базисным, предотвращая «залипание» якоря.

С целью выявления предельных возможностей и детального сравнения рассматриваемых двигателей выполнено их сравнение по интегральной работе A_u следующим образом. Для нескольких промежуточных значений воздушного зазора δ найдены площади S под кривыми статических сил тяги, взятыми по рис.2.49. Далее построены семейства кривых $A_u^* = f(\delta)$ (рис.2.50); при этом интегральная работа и зазор представлялись в относительных единицах.

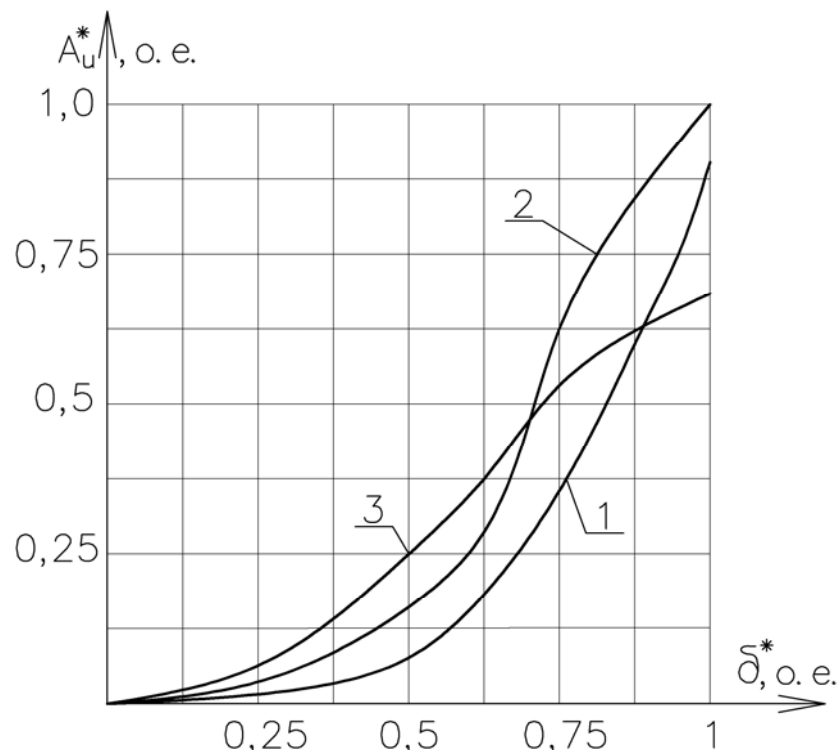


Рис.2.50 – Влияние $\Delta l_{я}$ на относительную интегральную работу A_u^* :
1 – $\Delta l_{я} = 0$; 2 – $\Delta l_{я} = 0,2\delta$; 3 – $\Delta l_{я} = 0,3\delta$.

Оценка A_u^* ЛЭМД на всем интервале перемещения якоря от максимального $\delta = \delta_n$ до нулевого $\delta = 0$ под действием электромагнитной силы F_m

показала, что двигатель с $\Delta l_{\text{я}}=0,2\delta$ имеет повышенную относительную интегральную работу A^*_u (рис.2.50, кривая 2). Это объясняется увеличенным начальным усилием $F_{\text{т.н}}$, в сравнении с двигателем с $\Delta l_{\text{я}}=0$ (рис.2.50, кривая 1), и максимальным усилием $F_{\text{т.м}}$, в сравнении с ЛЭМД с $\Delta l_{\text{я}}=0,3\delta$ (рис.2.50, кривая 3). Низкими значениями A^*_u обладает двигатель с $\Delta l_{\text{я}}=0,3\delta$, что объясняется значительным снижением тягового усилия $F_{\text{т.к}}$ в области малых зазоров и уменьшением доли работы A^*_u , совершаемой в последней четверти хода якоря. Основные удельные показатели исследуемых ЛЭМД приведены в таблице 2.5 [83,195].

Табл.2.5 – Относительные показатели ЛЭМД с различной величиной $\Delta l_{\text{я}}$

Величина $\Delta l_{\text{я}}$	$F^*_{\text{т.н}}$, о.е.	$F^*_{\text{т.к}}$, о.е.	$F^*_{\text{т.м}}$, о.е.	A^*_u , о.е.
$\Delta l_{\text{я}}=0$	0,68	1	1	0,83
$\Delta l_{\text{я}}=0,2\delta$	0,85	0,7	0,85	1
$\Delta l_{\text{я}}=0,3\delta$	1	0,13	0,7	0,7

Важным конструктивным и магнитным элементом ударной машины является направляющий корпус (НК) ЛЭМД. При работе в ударном режиме корпус испытывает значительные механические нагрузки.

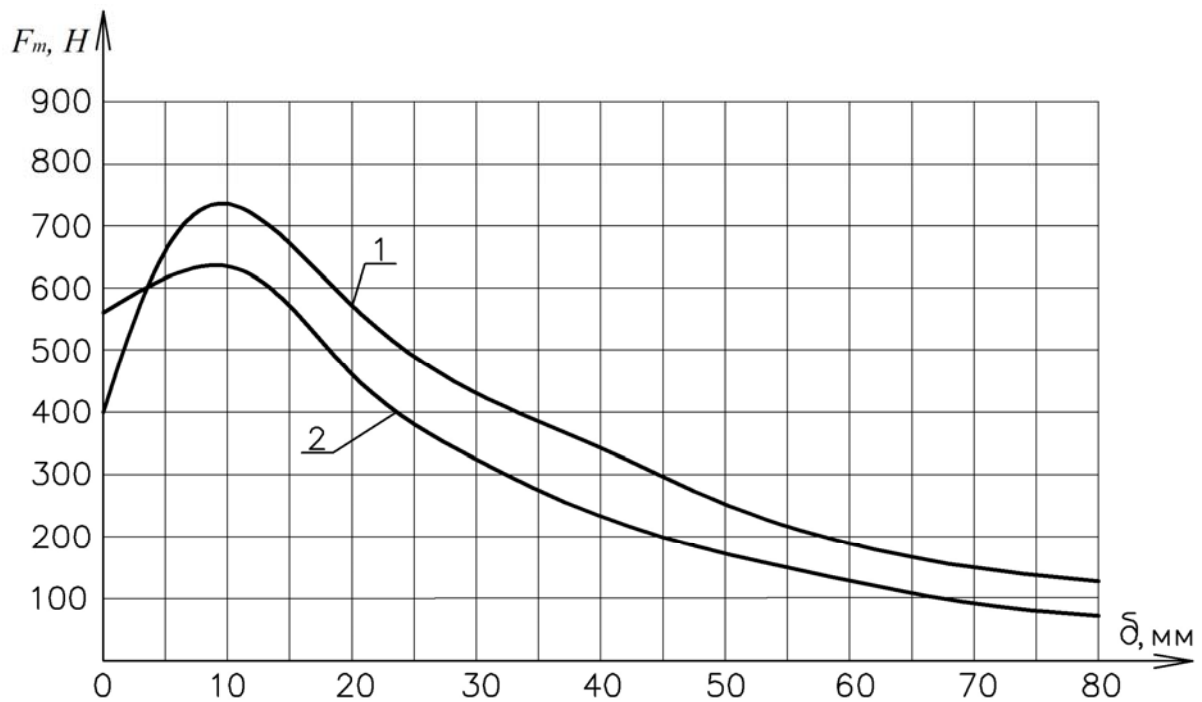


Рис.2.51 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД: с ферромагнитным (1) и неферромагнитным (2) направляющими корпусами.

С целью снижения массы электромагнитной машины и повышения отдельных показателей целесообразно использовать направляющий корпус, изготовленный из легких сплавов (например, дюралюминиевых). Однако, при необходимости, допустимо изготавливать этот элемент из стали в ущерб удельным показателям.

Сравнительный анализ статических тяговых характеристик двигателей с ферромагнитным – стальным (рис.2.51, кривая 1) и неферромагнитным – дюралюминиевым (рис.2.51, кривая 2) направляющими корпусами показал, что ЛЭМД со стальным НК имеет большее начальное тяговое усилие $F_{т.н}^1$, превосходящее $F_{т.н}^2$ на 40 %, что обусловлено перераспределением магнитного потока в верхнем зазоре. Однако для двигателей с ферромагнитным направляющим корпусом характерно меньшее конечное усилие $F_{т.к}^1 = 0,7 F_{т.к}^2$.

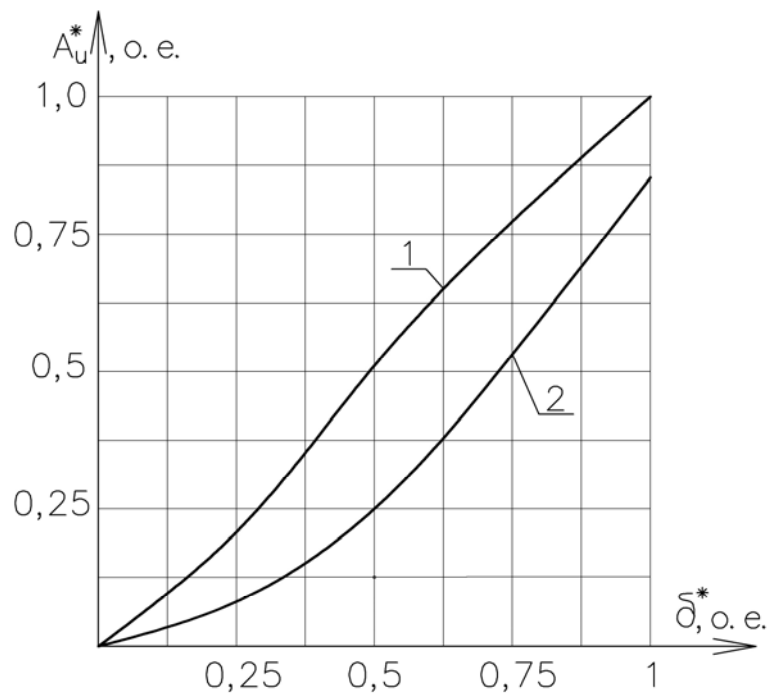


Рис.2.52 – Влияние материала направляющего корпуса на относительную интегральную работу A_u^* : 1 – ферромагнитный НК; 2 – неферромагнитный НК.

При проведении сравнительного анализа ЛЭМД по относительной интегральной работе (рис.2.52) было установлено, что A_u^* двигателя с НК из ферромагнитного материала на 22 % выше по сравнению с аналогичным ЛЭМД с неферромагнитным НК [83,195].

2.6 Выводы по второй главе

Исследованием теоретических и имитационных моделей магнитной системы, процессов нагревания-охлаждения цилиндрических электромеханических электромагнитных преобразователей установлено и для магнитных систем экспериментально, на физических образцах ЛЭМД-приводов, с расхождением до 17 %, подтверждено:

- сквозной осевой канал диаметром до 0,3 диаметра якоря в магнитопроводе, снижающий силовые и энергетические показатели двухзазорного цилиндрического ЛЭМД до 15 % в сравнении с ЛЭМД без канала, расширяет функциональность и области эффективного применения и двигателей, и ЛЭМД-приводов;
- повышение нормированного значения продолжительности включения ПВ или необходимое уменьшение нагрева ЛЭМД-привода обеспечивается: при нефорсированном энергопитании – увеличением исходной внешней теплоотдающей поверхности S двигателя до значения не более $2,5S$ при пренебрежимом снижении удельных показателей системы; при форсированном питании – интенсификацией движущимся якорем охлаждающих воздушных потоков – самовентиляцией, – действие которой эквивалентно уменьшению теплового сопротивления исходного двигателя до 35 %;
- самовентиляция обеспечивает работу ЛЭМД-привода в продолжительном режиме S1, когда потребляемая за единичный цикл от источника энергия не превышает 550...600 Дж на квадратный метр охлаждающей поверхности двигателя.

3. КОМПОНОВОЧНЫЕ СХЕМЫ РАБОЧИХ МАШИН С ЛЭМД-ПРИВОДАМИ

С учетом результатов исследований, приведенных во второй главе, разработаны машины с ударным и безударным ЛЭМД-приводом.

При этом, важным этапом создания приводов с ЛЭМД выступает разработка преобразователей для передачи механической энергии двигателя исполнительным органам рабочих машин. От конструкции и показателей этих устройств зависят определяющие характеристики привода [83,124,195,196,230].

3.1 Машины с ЛЭМД-приводом ударного действия

3.1.1 Машина для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт

При неторцевой забивке стержневых элементов в устройстве передачи механической энергии (УПМЭ) необходим специальный зажимной механизм, замыкание которого обеспечивает необходимые усилия зажима и силы сцепления «наковальня – стержень», исключающие проскальзывание машины по стержню. Это условие наиболее просто реализуется в случае применения в УМПЭ клиновой передачи, которая обладает конструктивной простотой и при малых размерах и массе характеризуется большими передаточными отношениями при редуцировании усилий.

Для электромагнитных ударных машин представляет наибольший интерес зажимной механизм с самотормозящимся клиновым сопряжением [24,25,156,195]. Конструктивная схема устройства приведена на рис.3.1.

Во время работы зажимной механизм жестко связывает ударную машину со стержнем и передает ему ударные импульсы, под действием которых он погружается в грунт. Действие сил отдачи воспринимается упругими силами грунта и

трением в самотормозящейся паре. При приближении машины к поверхности грунта ее перемещают по стержню вверх, и при очередном ударе машина закрепляется на новом уровне и далее процесс повторяется.

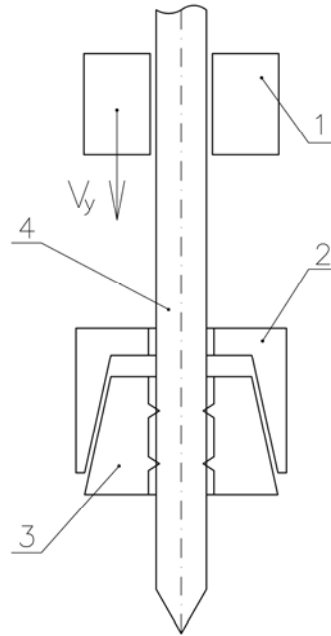


Рис.3.1 – Зажимной механизм с самотормозящимся клиновым сопряжением:
1 – ударная масса; 2 – корпус зажимного приспособления; 3 – заклинивающие элементы;
4 – забиваемый стержень.

Зажимной механизм с самотормозящимся клиновым сопряжением легко komponуется в конструкцию электромагнитной ударной машины с ЛЭМД.

При выборе основных геометрических параметров зажимного механизма можно воспользоваться рекомендациями, полученными Б.Н. Смоляницким в работе [156].

Ударная система (рис.3.2) характеризуется углом конусности наковальни клиновидного сопряжения и наружной поверхности заклинивающих элементов – α ; высотой заклинивающих элементов – h_k ; расстоянием от плоскости соударения якоря с наковальней до верхнего торца заклинивающих элементов – Z ; длиной и наружным диаметром наковальни L_n , D_n ; длиной и диаметром ударника L_y , D_y ; типом рабочей поверхности заклинивающих элементов, контактирующей с боковой поверхностью стержня. Параметры клинового зажима удобно представить в виде геометрических критериев $\lambda_n = L_n/L_y$; $\lambda_k = h_k/L_n$; $\lambda_Z = Z/L_n$, численные значения которых $0 < \lambda < 1$.

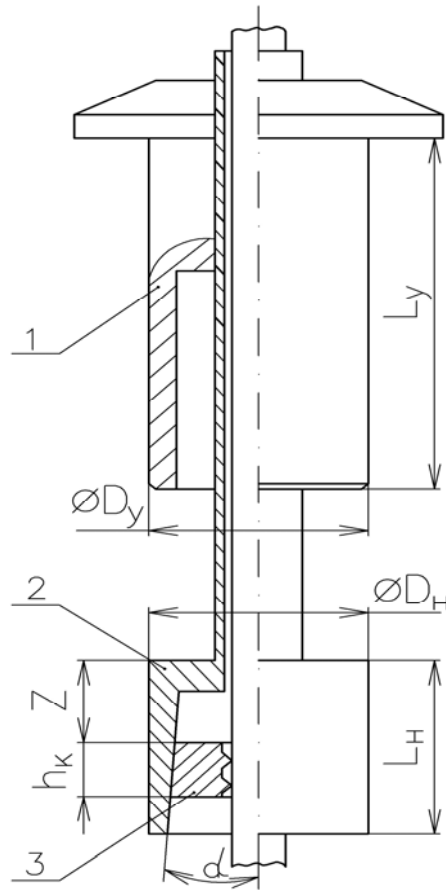


Рис.3.2 – Основные элементы и параметры системы передачи ударных импульсов:
1 – ударник, 2 – корпус зажимного приспособления, 3 – заклинивающие элементы

Для повышения эффективности передачи энергии удара следует стремиться к возможному увеличению параметров λ_n (0,6...0,85) и λ_z (0,4...0,7) и уменьшению параметра λ_k (0,4...0,3), то есть сближать длину наковальни и ударника, уменьшать высоту – h_k заклинивающих элементов и сокращать расстояние от их верхнего торца до плоскости соударения ударника с наковальней.

Важным преимуществом клинового сопряжения является пропорциональная зависимость зажимного усилия и передаваемой активной нагрузки. Это позволяет при правильно выбранной геометрии клина и рабочей кромки зажимного элемента осуществлять эффективное замыкание стержня. Под эффективным понимается замыкание, исключая проскальзывание зажимных элементов по стержню, либо протрагивание поверхности стержня рабочими кромками зажимных элементов. Необходимые зажимные усилия в общем случае определяются силами сопротивления среды, в которую погружается заземлитель, материалом стержня, материалом зажимных элементов, а также геометрией клина и рабочей

кромки. Эти же факторы определяют и эффективность передачи стержню подведенной энергии, потери которой в зажимном механизме связаны с деформациями стержня, зажимных элементов, трением скользящих поверхностей.

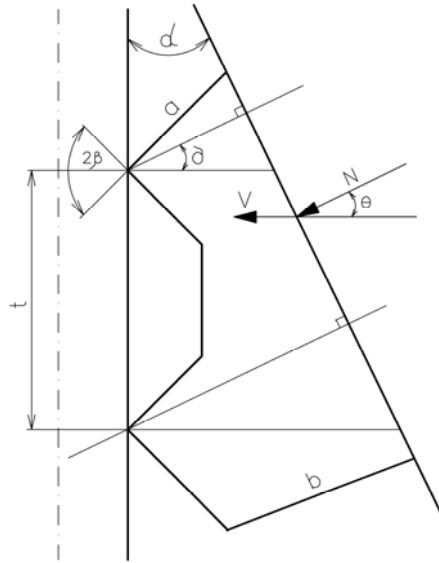


Рис.3.3 – Схема нагружения заклинивающего элемента

На рис.3.3 показана общая схема нагружения заклинивающего элемента с рассматриваемыми геометрическими характеристиками (Θ – угол давления, образованный направлением нормальной силы N , действующей на клин, и вектором его скорости V ; α – угол подъема клина; a – задняя грань; b – передняя грань [156].

С точки зрения обеспечения эффективности замыкания необходимо стремиться к максимальному внедрению рабочей кромки зажимного элемента в боковую поверхность стержня. В работах [24,25,156] рассмотрена методика определения параметров зажимного элемента клинового сопряжения и предлагается следующая последовательность построения геометрии зажимного клинового элемента (рис.3.4).

1. Прямыми линиями ограничивается поверхность зажимаемого стержня и клиновая поверхность. Угол подъема клина $\alpha = \Theta$ принимается равным $15 - 18^\circ$.
2. Из произвольно выбранной точки на боковой поверхности зажимаемого элемента проводится линия действия замыкающей силы N (нормально к клиновой поверхности) и ось симметрии (биссектриса угла заострения 2β) рабочей кромки.

ки. Так как предпочтительно иметь угол δ между нормальными $\delta = \alpha$, то в зависимости от выбранного α он составит $\delta = 15 - 18^\circ$.

3. От оси симметрии клина откладывается в обе стороны угол заострения рабочей кромки β , выбранный из условий ее прочности ($\beta = 40 - 45^\circ$).
4. Назначается число рабочих кромок. С целью снижения удельных давлений и изгибающих нагрузок на одну кромку число кромок на одном зажимном элементе обычно назначают на менее двух, причем расстояние между ними должно превышать размеры зоны пластической деформации от внедрения косоугольного клина в тело стержня. В противном случае наблюдается быстро прогрессирующий сдвиг частиц металла с боковой поверхности погружаемого стержневого элемента. Шаг расположения рабочих кромок на зажимном элементе рекомендуется выбирать не менее 10 мм.
5. Окончательно оформляются контуры зажимного элемента. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы результирующая замыкающая сила N была приложена, по возможности, в центре контакта с корпусом. Это обеспечит меньшие местные контактные напряжения.

Таким образом, рациональными значениями углов являются: $\alpha = \theta = \delta = 15 - 18^\circ$, $\beta = 40 - 45^\circ$.

Вследствие небольшого угла подъема клина, диапазон изменения диаметров зажимаемых стержней невелик. Для погружения металлических стержней разных диаметров предложено применение нескольких комплектов заклинивающих элементов. В этом случае величина диаметра забиваемого стержня для одной машины ограничивается только диаметром сквозного осевого канала направляющей.

Проведенные исследования позволили создать ударную машину с ЛЭМД для погружения длинных, продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт, конструктивная схема которой представлена на рис.3.4 [195,228,244,249].

Электромагнитная машина содержит корпус-статор 4 с рукояткой 5, верхнюю 1 и нижнюю 10 крышки, обмотку 6, цилиндрический якорь – боек 3 с плоской дисковой частью 2, цилиндрическую пружину 7, направляющую 8 с нако-

вальной 9 и корпусом 11 зажимного приспособления для соединения ударной машины со стержнем 13 с помощью заклинивающих элементов 12.

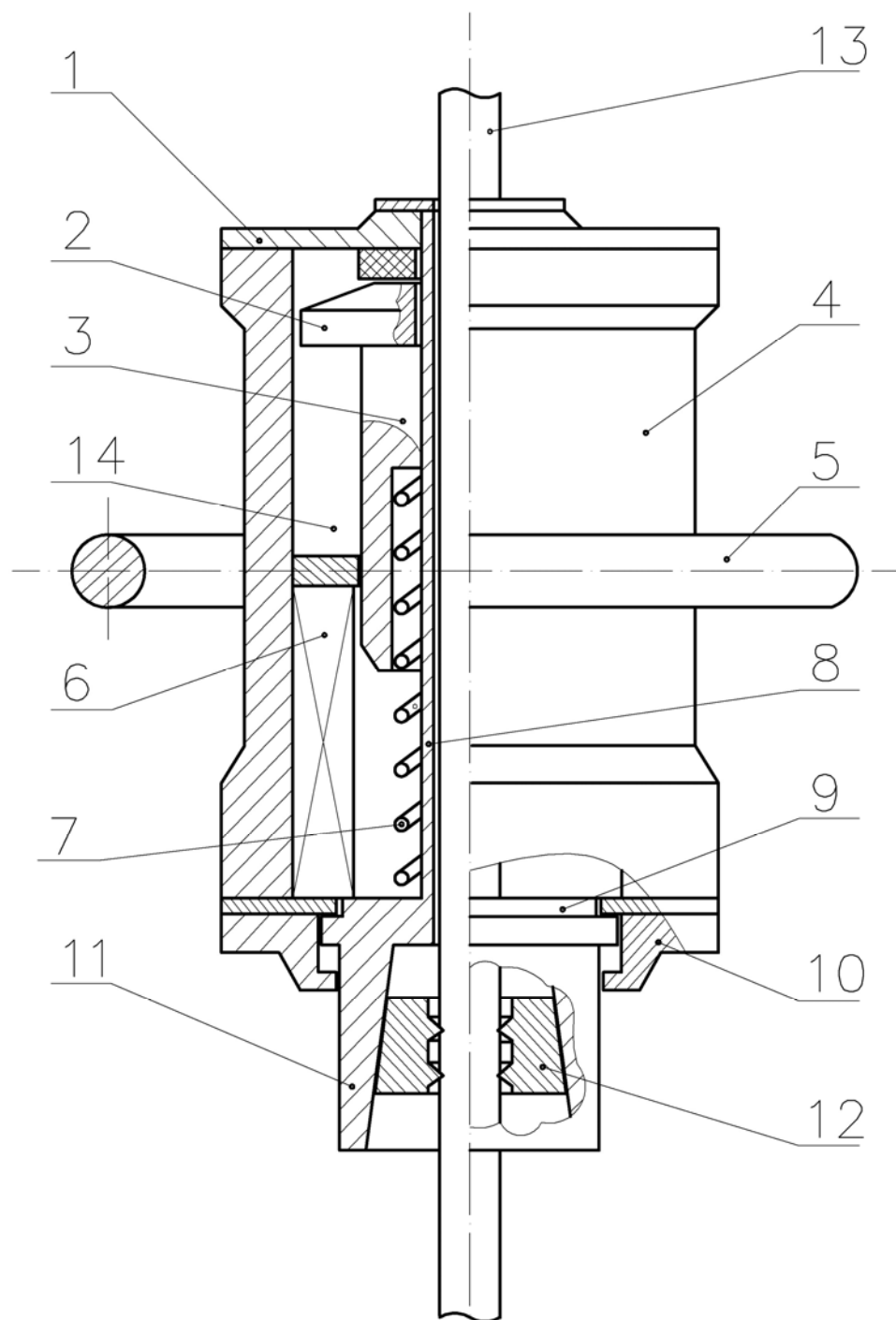


Рис.3.4 – Электромагнитная машина ударного действия для погружения стержневых элементов в грунт.

Забиваемый стержень 13 пропускается по направляющей 8 сквозь УМ между заклинивающими элементами 12 до упора в поверхность грунта. Удерживая стержень прижатым к грунту, поднимают по нему вверх ударную машину на высоту, при которой продольная устойчивость гибкого стержня еще сохраняется, и удар-

живают УМ в вертикальном положении за рукоятку 5. Заклинивающие элементы 12 под действием силы тяжести ударной машины зажимают стержень и предотвращают ее соскальзывание вниз по стержню 13.

Машина работает следующим образом. В обмотку 6 подается электрический импульс от источника питания – аккумулятора или конденсатора. Якорь 3 втягивается в обмотку под действием электромагнитной силы и, сжимая пружину 7, производит удар по наковальне 9. При ударе якоря по наковальне корпус зажимного приспособления 11 перемещается вниз относительно корпуса 4 машины и заклинивающие элементы 12, касающиеся острыми гранями стержня 13, проскальзывают по конической поверхности корпуса 11, сближаясь и надежно заклинивая забиваемый стержень. Окончание питающего импульса соответствует моменту соударения наковальни и якоря, который при этом силой сжатой пружины возвращается в исходное положение и цикл повторяется [195,249].

Установка катушки 6 в полости 14 корпуса 4 и якоря 3 с пружиной 7 на направляющей 8 дисковой частью 2 вниз к наковальне 9 делает машину обращенной, в которой электромагнитная сила обеспечивает зарядку пружинного 7 и гравитационного накопителей, а рабочий ход якоря и удар по наковальне 9 производится действием сил пружины 7 и веса якоря.

При каждом ударе якоря по наковальне зажимное приспособление 11 вместе с заклиненным стержнем смещается вниз в осевом направлении относительно корпуса 4 машины и вдавливают стержень в грунт. Частичная кинематическая развязка корпусов 4 и 11 улучшает соотношение соударяющихся масс «боек – забиваемый элемент», повышает эффективность передачи ударных воздействий и улучшает вибрационно-силовые характеристики машины.

Таким образом, регулярно переставляя электромагнитную ударную машину по длинному забиваемому стержню 13, обеспечивают его погружение в грунт.

3.1.2 Машина для сводообрушения

Основой сводообрушителя является линейный электромагнитный двигатель, генерирующий за счет возвратно-поступательных движений якоря силовые

ударные импульсы, передаваемые в среду. Основные требования к устройствам передачи механической энергии (УПМЭ) перечислены в работах [14,37,104,179,195,230].

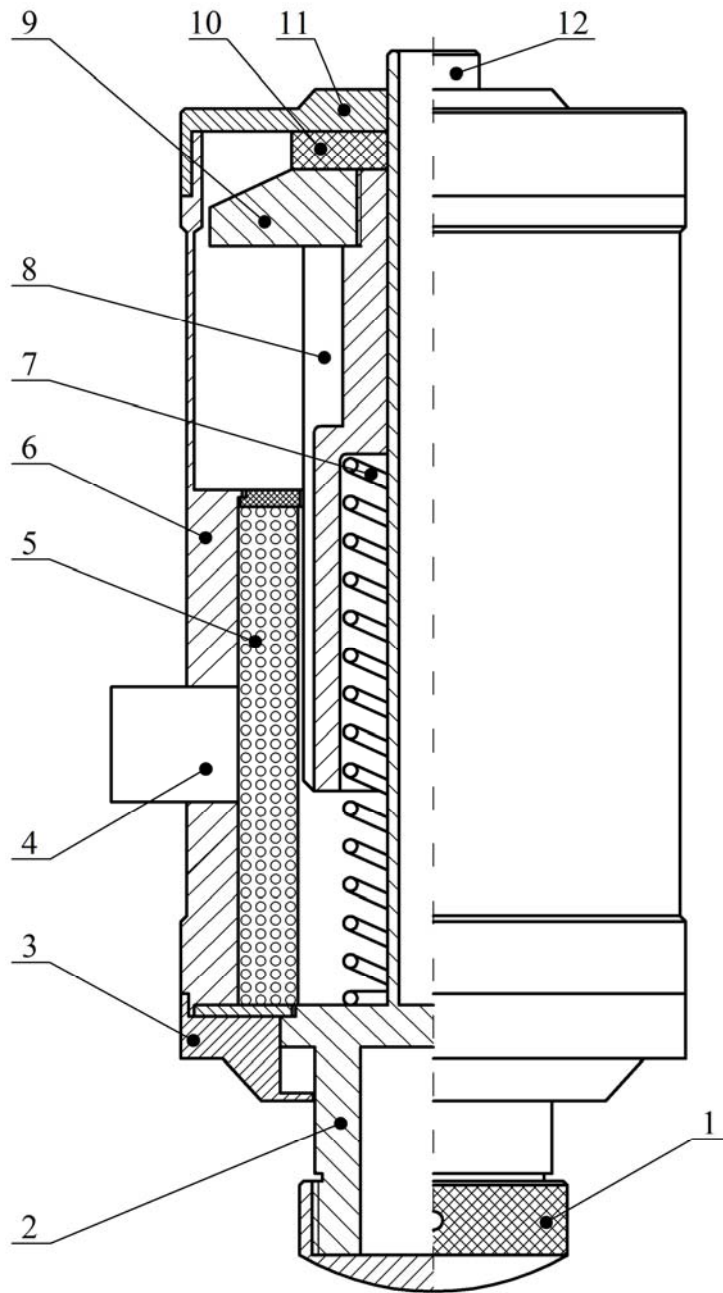


Рис.3.5 – Конструкция сводообрушителя с ЛЭМД: 1 – ударник; 2 – наковальня; 3 – нижняя крышка; 4 – клеммная коробка; 5 – обмотка; 6 – корпус-статор; 7 – возвратная пружина; 8,9 – комбинированный якорь; 10 – резиновый буфер; 11 – верхняя крышка; 12 – направляющая.

Предлагаемая в развитие [179,180,195,229] конструкция редкоударного импульсного электромагнитного сводообрушителя с увеличенным ходом якоря двигателя показана на рис.3.5. Подробное описание конструкции и рабочего процесса представлено в работе [250].

3.2 Машины с ЛЭМД-приводом неударного действия

3.2.1 Штанговые, тросовые транспортеры

В работе [122] рассмотрен конусный зажимной механизм (рис.3.6), возможности которого представляются ограниченными, если исполнительный орган выполнен в виде гладкой, с обработанной поверхностью, штангой.

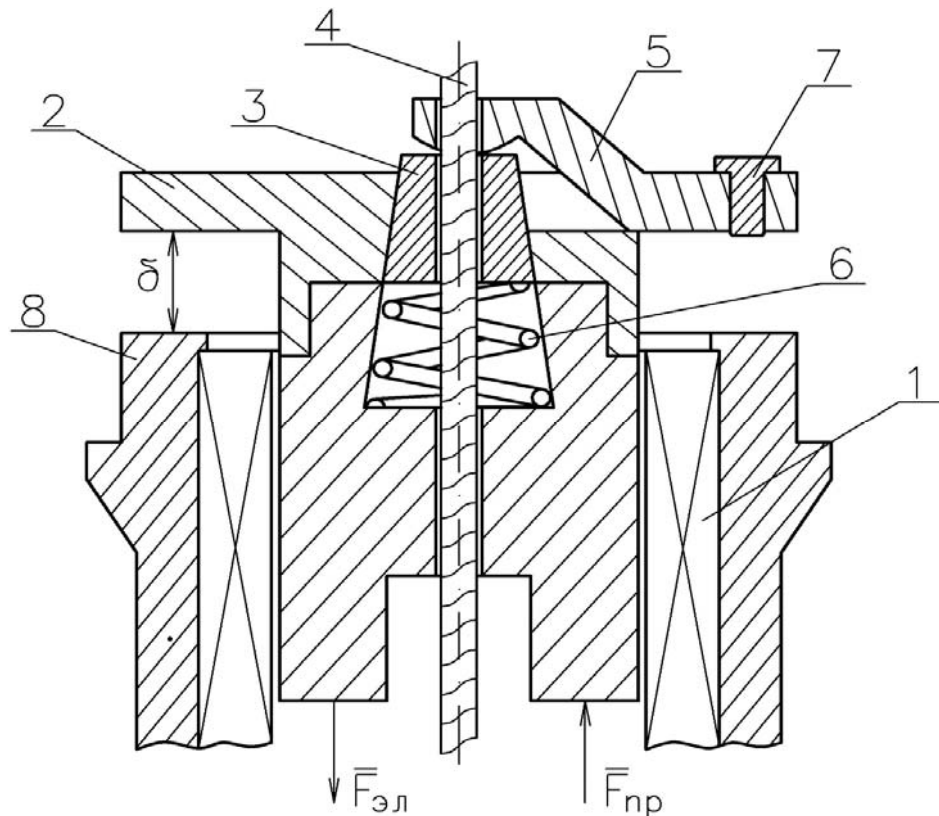


Рис.3.6 – УПМЭ в системе «ЛЭМД–рабочий орган».

В развитие представленного на рис.3.6, предложен зажимной механизм со сферическими заклинивающими элементами, показанный на рис.3.7 [6].

На рис.3.7 показана схема сил для случая, когда комбинированный якорь 1 под действием электромагнитной силы совершает рабочий ход. При этом сферические зажимы 3 заклинивают исполнительный орган 2 и сообщают ему поступательное движение от якоря 1 [6].

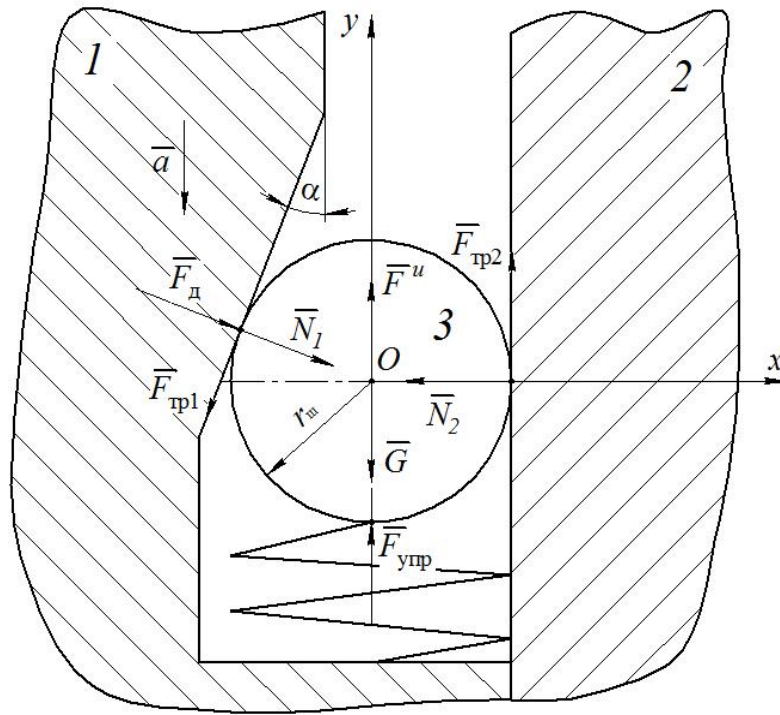


Рис.3.7 – Расчетная схема сил сферических зажимов: 1 – комбинированный якорь; 2 – исполнительный орган; 3 – сферический (шариковый) зажим.

Совокупность действующих на шарик сил в зажимном механизме имеет вид [6,158,160]:

- сила тяжести G :

$$G = m_{ш} g \quad (3.1)$$

где $m_{ш}$ – масса шарика;

- сила инерции F^u :

$$F^u = m_{ш} a \quad (3.2)$$

где a – ускорение якоря, шарика; $F_{упр} = c\Delta l$ – сила упругости пружины; c – коэффициент жесткости пружины;

- F_d – нормальная сила в сочленении «якорь – шарик»;
- N_1 и N_2 – реакции шарика и исполнительного органа соответственно;
- F_{mp1} и F_{mp2} – силы трения качения в сочленении «якорь – шарик», «шарик – исполнительный орган» соответственно:

$$F_{mp1} = N_1 \frac{k}{r_{ш}}, \quad F_{mp2} = N_2 \frac{k}{r_{ш}}, \quad (3.3)$$

где k – коэффициент трения качения, $r_{ш}$ – радиус шарика [6,158].

Представим шарик материальной точкой. В соответствии с принципом Даламбера геометрическая сумма действующих на точку активных, реактивных сил и условно приложенной силы инерции [6]:

$$\overline{G} + \overline{F}^u + \overline{F}_{\text{ynp}} + \overline{F}_{\delta} + \overline{N}_1 + \overline{N}_2 + \overline{F}_{\text{mp1}} + \overline{F}_{\text{mp2}} = 0. \quad (3.4)$$

Для прямоугольной системы координат xOy проекции сил (3.4) на оси x и y :

Ох: $F_{\text{д}} \cos \alpha + N_1 \cos \alpha - F_{\text{тр1}} \sin \alpha - N_2 = 0$, где α – угол конусных проточек якоря.

$$\begin{aligned} N_2 &= F_{\text{д}} \cos \alpha + N_1 \cos \alpha - N_1 \frac{k}{r_{\text{ш}}} \sin \alpha = 0, \\ N_2 &= F_{\text{д}} \cos \alpha + N_1 \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{\text{ш}}} \sin \alpha \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\text{Oy: } F^u + F_{\text{ynp}} - G + F_{\text{тр2}} - F_{\text{тр1}} \cos \alpha - F_{\text{д}} \sin \alpha + N_1 \sin \alpha = 0,$$

$$m_{\text{ш}} a + c\Delta l - \cos \alpha - m_{\text{ш}} g + N_2 \frac{k}{r_{\text{ш}}} - N_1 \frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - F_{\text{д}} \sin \alpha + N_1 \sin \alpha = 0. \quad (3.6)$$

После преобразований (3.6), (3.6) получим [10,158]:

$$\begin{aligned} m_{\text{ш}}(a - g) + c\Delta l + F_{\text{д}} \left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - \sin \alpha \right) - N_1 \sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \right)^2 + 1 \right) &= 0, \\ N_1 &= \frac{m_{\text{ш}}(a - g) + c\Delta l + F_{\text{д}} \left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \right)^2 + 1 \right)}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Окончательно имеем:

$$N_2 = F_{\text{д}} \cos \alpha + \frac{m_{\text{ш}}(a - g) + c\Delta l + F_{\text{д}} \left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \right)^2 + 1 \right)} \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{\text{ш}}} \sin \alpha \right). \quad (3.8)$$

Движущая сила исполнительного органа:

$$F_{\text{дв}} = bF_{\text{тр2}}, \quad (3.9)$$

где b – количество шариков; согласно конструктивной схеме $b = 3$.

Нормальная сила в сочленении «якорь – шарик» F_d будет равна тяговому усилию, создаваемому якорем во время его рабочего хода под действием электромагнитной силы [6]:

$$F_d = 0,5i^2 \frac{dL}{d\delta}, \quad (3.10)$$

где i – сила тока в обмотке на рабочем ходе якоря, δ – величина рабочего зазора, L – индуктивность обмотки.

Мощность, передаваемая якорем исполнительному органу на рабочем ходе:

$$N_{\text{ср}}^{\text{пол}} = F_{\text{дв}} v_{\text{ср}}, \quad (3.11)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость перемещения рабочего органа в течение одного рабочего цикла.

$$v_{\text{ср}} = \frac{\delta}{t_{\text{ц}}}, \quad (3.12)$$

где δ – перемещение исполнительного органа за один цикл; $t_{\text{ц}}$ – продолжительность одного рабочего цикла.

Пренебрегая погрешностями, приравниваем среднюю $v_{\text{ср}}$ и мгновенную $v_{\text{р.о.}}$ скорости рабочего органа, т.е. $v_{\text{ср}} = v_{\text{р.о.}}$. Тогда с учетом (3.8), (3.9) (3.10) механическая мощность двигателя будет определена:

$$N_{\text{пол}} = v_{\text{р.о.}} \left[0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \cos \alpha + \frac{m_{\text{ш}}(a-g) + c\Delta l + 0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{\text{ш}}} \right)^2 + 1 \right)} \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{\text{ш}}} \sin \alpha \right) \right] \frac{k}{r_{\text{ш}}} b. \quad (3.13)$$

Мощность, затрачиваемая на движение исполнительного органа

$$N_{\text{зат}} = F_d v_{\text{р.о.}}, \quad (3.14)$$

или с учетом (3.10)

$$N_{\text{зат}} = 0,5i^2 \frac{dL}{d\delta} v_{\text{р.о.}}. \quad (3.15)$$

Коэффициент передачи предлагаемого зажимного механизма со сферическими заклинивающими элементами с учетом (3.11) и (3.14) определяется отношением сил

$$\eta_{3.м.} = \frac{F_{дв.}}{F_{д.}}. \quad (3.16)$$

На основании полученных выражений (3.8), (3.9) и (3.10)

$$\eta_{3.м.} = \frac{b \left[0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \cos \alpha + \frac{m_{ш} (a - g) + c\Delta l + 0,5i^2 \frac{dl}{d\delta} \left(\frac{k}{r_{ш}} \cos \alpha - \sin \alpha \right)}{\sin \alpha \left(\left(\frac{k}{r_{ш}} \right)^2 + 1 \right)} \left(\cos \alpha - \frac{k}{r_{ш}} \sin \alpha \right) \right] \frac{k}{r_{ш}}}{0,5i^2 \frac{dl}{d\delta}}. \quad (3.17)$$

Таким образом, на значение коэффициента передачи устройства будут влиять количество сферических элементов – шариков, их масса, геометрические параметры и физико-механические свойства, а также угол α конусной проточки якоря (рис.3.8) [6].

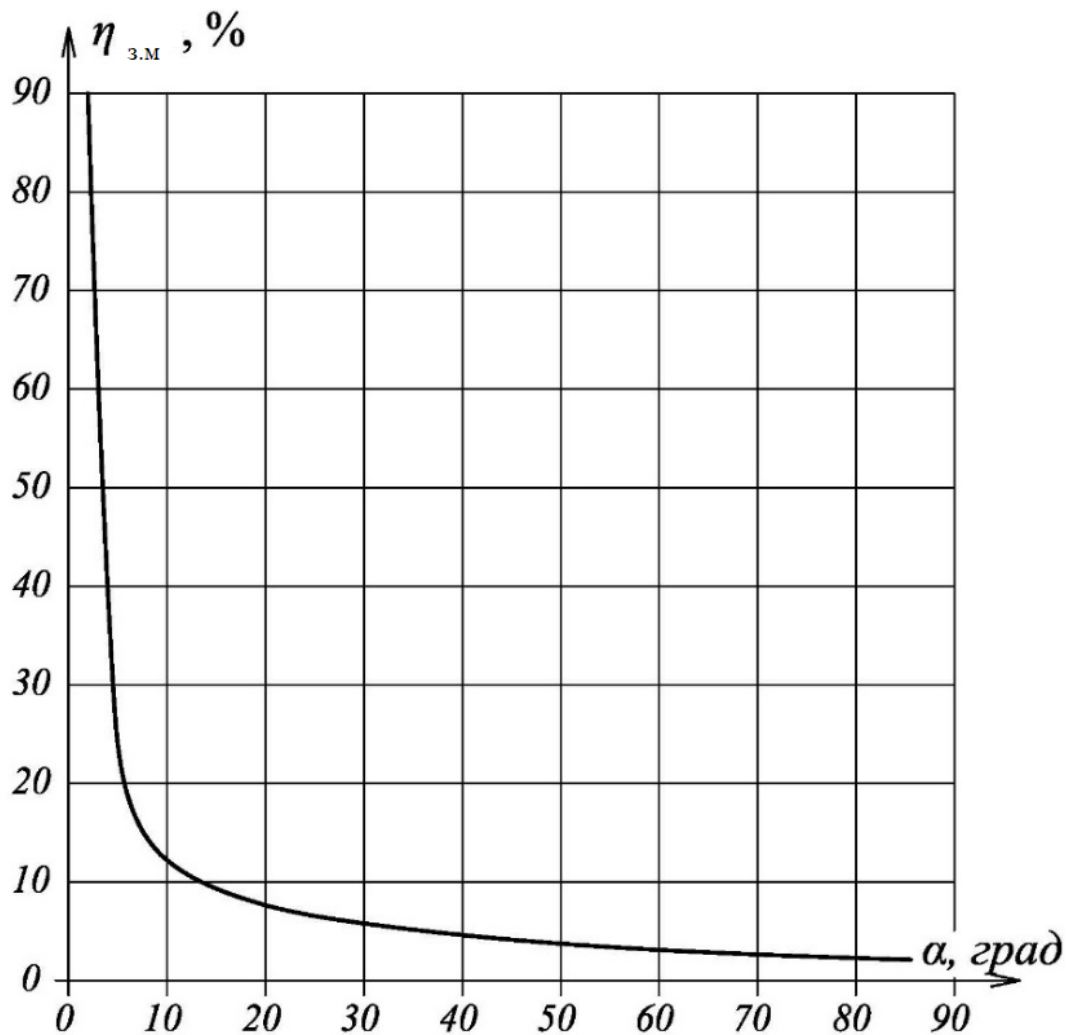


Рис.3.8 – Зависимость коэффициента передачи зажимного механизма со сферическими заклинивающими элементами от угла α конусной проточки якоря.

Анализ характеристики (рис.3.8) показывает, что величина коэффициента передачи зажимного механизма обратно пропорционален углу α . Поэтому для повышения эффективности ее работы предлагается принимать минимально возможное значение угла α .

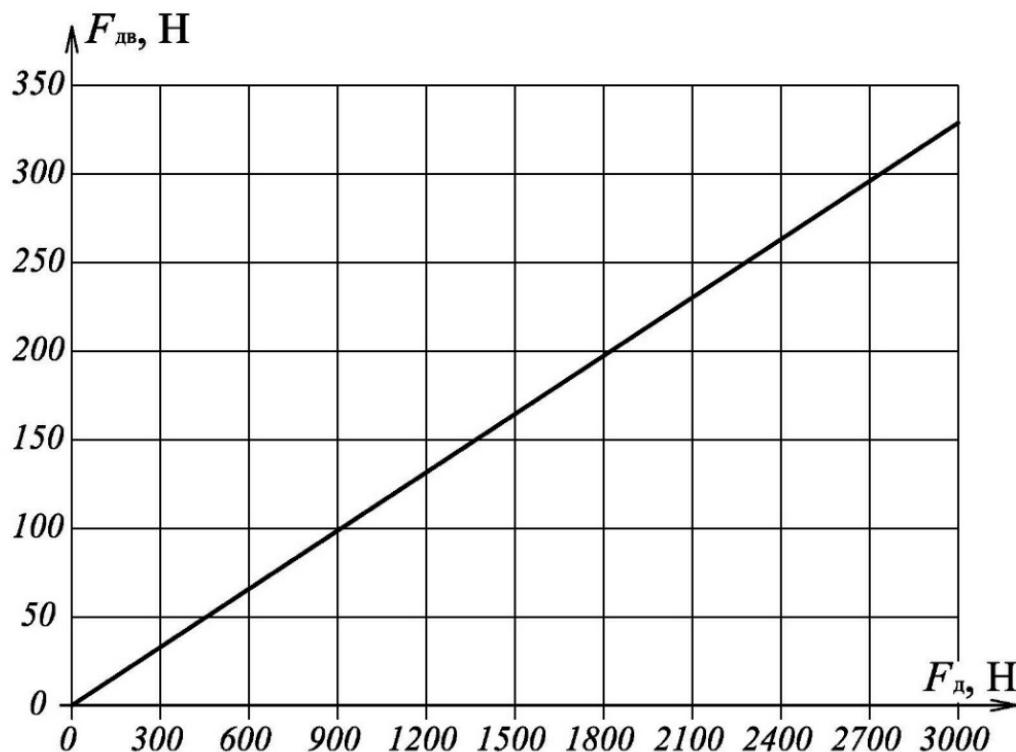


Рис.3.9 – Зависимость значения $F_{дв}$ от нормальной силы в сочленении «якорь – шарик» F_d .

Работа предлагаемого шарикового зажимного механизма аналогична клиновому самотормозящему механизму с роликами, поэтому согласно рекомендациям $\alpha > 10^\circ$ [158]. Если принять значение $\alpha = 11^\circ$, КПД устройства составит 10,84%.

На рис.3.9 показана зависимость значения $F_{дв}$ от нормальной силы в сочленении «якорь – шарик» F_d [6], которая может быть выражена уравнением:

$$F_{дв} = 0,1084 F_d \quad (3.18)$$

Таким образом с учетом требуемого значения $F_{дв}$ рассчитывается необходимое тяговое усилие ЛЭМД для привода исполнительного органа. Возможно также решение обратной задачи.

Установки с однонаправленным движением исполнительного органа.

Характерный пример конструкции ЛЭМД-привода безударного действия с осевым каналом приведен в [124,146,183,197,230].

В исходном состоянии комбинированный якорь 5 поджат возвратной пружиной 6 к направляющему корпусу 3, а подпружиненные в осевом направлении заклинивающие шариковые зажимы 8 полностью входят в конусную проточку якоря и плотно прижаты к рабочему органу 9 по боковой поверхности.

При подаче в обмотку 4 питающего электрического импульса от источника комбинированный якорь 5 под действием электромагнитной силы втягивается в обмотку 4, сжимая возвратную пружину 6. По окончании питающего импульса якорь 5 возвращается пружиной 6 в исходное положение, шариковые зажимы 8 освобождают исполнительный орган. Далее цикл повторяется.

Для обеспечения перемещения рабочей части исполнительного органа, например, шайб, дисков, зубьев и т.п., сквозь осевой канал двигателя при замкнутом однонаправленным движении, разработана конструкция ЛЭМД-привода, представленная в работе [202].

Установки с реверсивным движением исполнительного органа.

Для обеспечения двунаправленного движения исполнительного органа, например, троса, представляются необходимыми реверсивные ЛЭМД-приводы. Из заявленных в публикациях [203,227] приводов рассмотрим представленный на рис.3.11 реверсивный ЛЭМД-привод с фиксаторами сферического типа. Он предназначен для реверсивного перемещения рабочего органа, выполненного в виде гладкого, твердого цилиндрического штока [125,144].

Устройство содержит осевой канал, в который помещен рабочий орган 10 в виде гладкого цилиндрического штока, цилиндрический статор 1, возвратную пружину 9, первую крышку 2, первую обмотку 4, первый комбинированный якорь 6 с плоской дисковой частью 8. Рабочий орган 10 пропущен в осевой канал первого 6 и второго 7 якоря через отверстия в крышках 2, 3. Силовое сочленение рабочего органа 10 с каждым якорем 6 или 7 на рабочем ходе обеспечивается подпружиненными с помощью пружины 11 стопорными элементами 12, 13, фиксация положения которых производится штоками 14, 15, имеющих на концах сфериче-

скую поверхность с регулировочными болтами 16, 17 для якоря 6 или 7 соответственно.

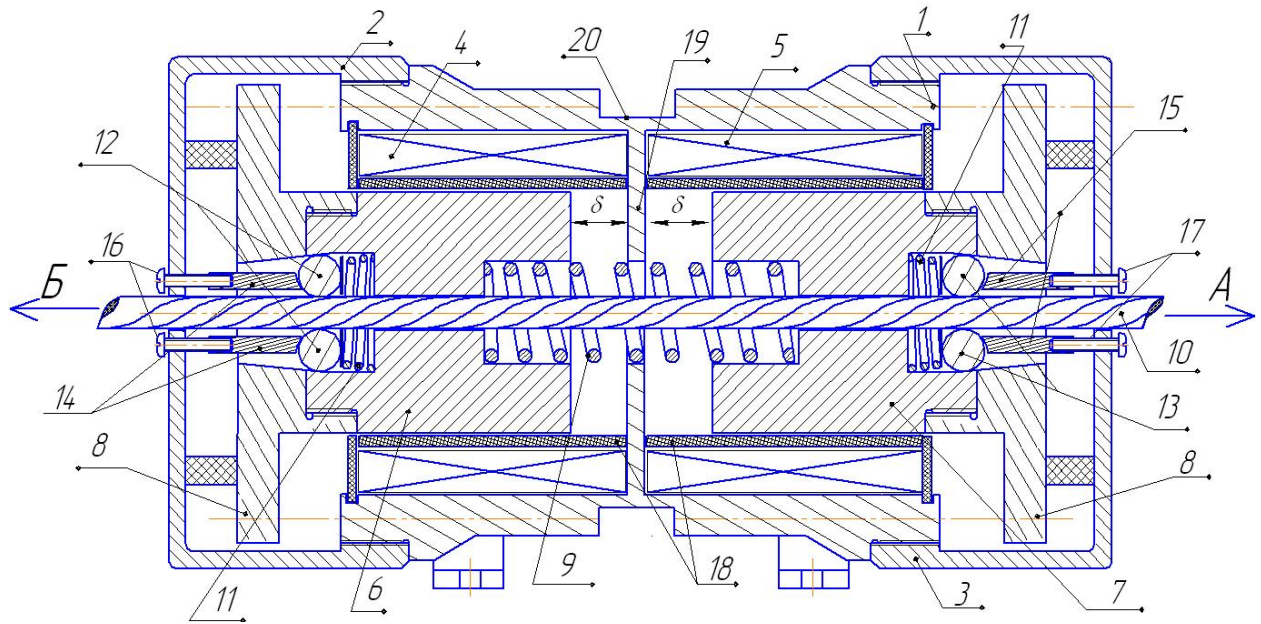


Рис.3.11 – Конструкция реверсивного шагового ЛЭМД с шариковым зажимным механизмом.

Стопорные элементы выполнены в виде трех металлических шаров, которые помещены в конусные проточки первого 6 и второго якоря 7 со стороны дисковой части и смещены друг относительно друга на угол 120° . Статор разделен внутри поперечно полюсом-шайбой 19 на две одинаковые части и содержит одинаковые с первыми вторую крышку 3, вторую обмотку 5 и второй якорь 7, срабатывающий попеременно с первым якорем. Перемещение каждого якоря ограничено при втягивании в обмотку - полюсом-шайбой 19, а при возврате пружиной 9 – крышками 2, 3. Концы проходящей через полюс-шайбу 19 возвратной пружины 9 заходят в цилиндрические проточки на торцах якорей 6, 7. На внешней поверхности статора предусмотрен кольцевой прямоугольный паз 20, выполненный коаксиально и симметрично относительно внутреннего полюса-шайбы 19. Соосность якорей и статора задается направляющими 18 [125,144].

При обесточенных обмотках 4, 5 оба якоря 6 и 7 поджаты к штокам 14 и 15 с регулировочными болтами 16, и 17 пружиной 9. При необходимости перемещения рабочего органа 10, например, в направлении А, на обмотку 4 подают напряжение от источника питания. Якорь 6 втягивается в обмотку 4 под действием электромагнитной силы, перемещаясь на величину δ (рабочий ход) и сжимая

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

По окончании питающего импульса якорь 6 возвращается возвратной пружиной 9 в исходное положение. При возвращении подпружиненные пружиной 11 стопорные элементы 12 отпускают рабочий орган. Далее цикл повторяется [125].

Для реверсирования рабочего органа 10 на обмотку 5 подают напряжение от источника питания. Якорь 7 втягивается в обмотку 5 под действием электромагнитной силы, перемещаясь в направлении Б на величину δ (рабочий ход) и сжимая пружину 9. Незначительные взаимные осевые перемещения шариковых зажимов 13, контактирующих по конусной поверхности проточек в якоре, создают значительные радиальные усилия, надежно зажимающие рабочий орган 10, который перемещается на величину δ хода комбинированного якоря 7. При этом штоки 14 создают усилия на стопорные элементы 12 радиально от рабочего органа 10 исключая его заклинивание.

По окончании питающего импульса якорь 7 возвращается возвратной пружиной 9 в исходное положение. При возвращении подпружиненные пружиной 11 стопорные элементы 13 отпускают рабочий орган. Далее цикл повторяется [125].

3.2.2 Прессы для отжима сока

При использовании в качестве исполнительного органа зубчатой штанги перспективным является применение УПМЭ, показанного на рис.3.12.

Процесс взаимодействия элементов в системе «якорь ЛЭМД – исполнительный орган» представляется следующим образом.

Якорь ЛЭМД имеет сквозной осевой канал, в который помещена зубчатая штанга 1. Для осуществления дискретного однонаправленного перемещения штанги служат специальные заклинивающие стопорные элементы 2, смонтиро-

ванные, соответственно на якоре и корпусе-статоре 4 двигателя и выполненные в виде плоских, радиально подвижных секторов, которые в рабочем состоянии поджаты пружиной 3 к зубчатой штанге 1.

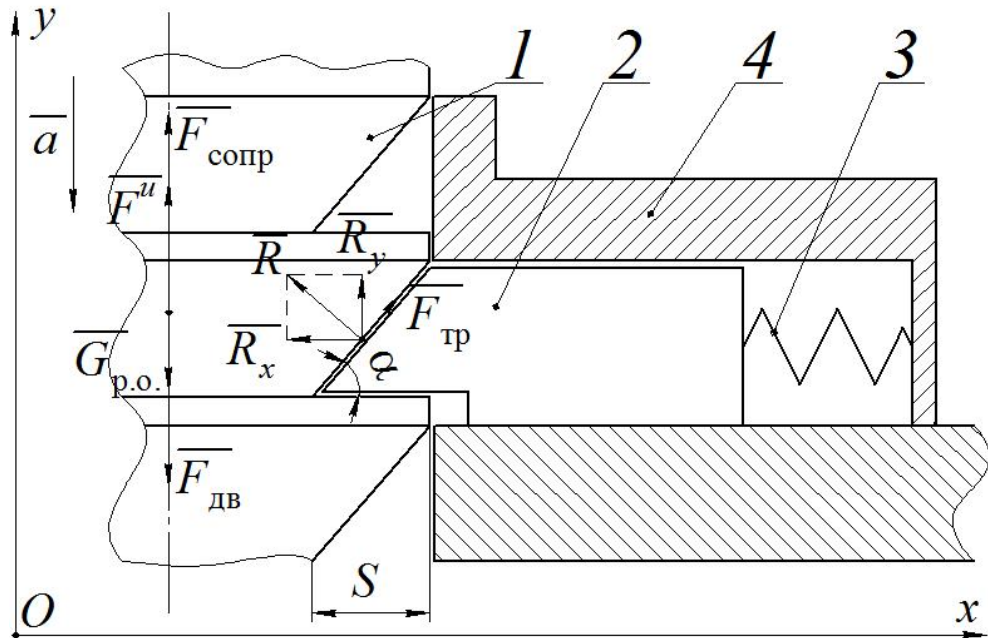


Рис.3.12 – Силевая схема рабочего органа: 1 – исполнительный (рабочий) орган (зубчатая штанга); 2 – заклинивающий элемент; 3 – пружина; 4 – статор двигателя.

Под действием электромагнитной силы якорь двигателя втягивается в обмотку, перемещая с помощью стопорных элементов 2 зубчатую штангу 1 в осевом направлении. Возникающие при этом между контактирующими конусными поверхностями зубьев штанги 1 и стопорных элементов 2 тангенциальные, направленные радиально усилия, и раздвигают их, преодолевая действие пружины 3.

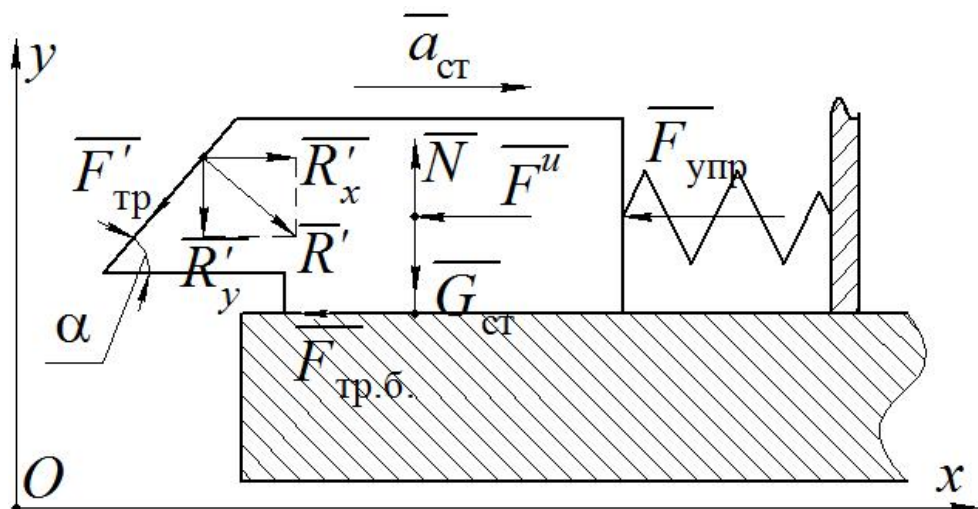


Рис.3.13 – Силевая схема стопорного элемента.

После полного втягивания якоря в обмотку и осевого перемещения штанги 1 на один шаг стопорные элементы 2 под действием пружины 3 вновь входят в зацепление с очередным зубом штанги 1. Далее циклы повторяются и, таким образом, происходит дискретное, поступательное, ограниченное лишь длиной штанги 1, движение рабочего органа.

Проведем силовой анализ устройства передачи механической энергии зубчатой штанге.

На исполнительный орган 1 действуют силы [137,158,160]:

- сила тяжести $G_{p.o.}$: $G_{p.o.} = m_{p.o.} \cdot g$, где $m_{p.o.}$ – масса исполнительного (рабочего) органа;
- сила инерции F^u : $F^u = m_{p.o.} \cdot a$, где a – ускорение исполнительного органа;
- сила $F_{дв}$, необходимая на перемещение рабочего органа 1;
- сила сопротивления $F_{сопр}$ перемещению рабочего органа 1 вследствие его взаимодействия с направляющими стенками 4 корпуса ЛЭМД и другими объектами внешней среды;
- реакция R , действующая на рабочий орган 1 со стороны стопорного элемента 2: $R_x = R \cdot \sin \alpha$, $R_y = R \cdot \cos \alpha$ – горизонтальная и вертикальная составляющие реакцию R ; α – угол наклона рабочей поверхности стопорных элементов;
- сила трения $F_{тр}$ исполнительного органа (зубчатой штанги) по рабочей поверхности стопорного элемента: $F_{тр} = R \cdot f$, где f – коэффициент трения скольжения.

Используя принцип Даламбера, спроецируем все силы, действующие на исполнительный орган, на выбранную ось y (рис.3.12):

$$-F_{дв} + R_y + F^u + F_{тр} \cdot \sin \alpha + F_{сопр} - G_{p.o.} = 0. \quad (3.19)$$

Рассмотрим систему сил, действующих на стопорный элемент (рис.3.13):

- сила тяжести $G_{ст}$: $G_{ст} = m_{ст} \cdot g$, где $m_{ст}$ – масса стопорного элемента;

- сила инерции $F^и$: $F^и = m_{ст} \cdot a_{ст}$, где $a_{ст}$ – ускорение, с которым перемещается стопорный элемент;
- реакция, действующая со стороны пружины, равная по модулю силе упругости пружины $F_{упр}$: $F_{упр} = c \cdot S$, где S – величина деформации пружины, c – коэффициент жесткости пружины; $c = \frac{G \cdot d_{пр}^4}{8 \cdot d_n^3 \cdot n}$, где $d_{пр}$ – диаметр проволоки пружины; d_n – диаметр намотки; n – число витков; G – модуль сдвига;
- реакция R' , действующая на стопорный элемент со стороны исполнительного органа, равная по модулю R и направленная в противоположную сторону;
- сила трения $F'_{тр}$ стопорного элемента по поверхности исполнительного органа:

$$F'_{тр} = R' \cdot f$$
;
- нормальная реакция N направляющей поверхности;
- сила трения $F_{тр.б}$ боковой поверхности стопорного элемента о направляющую поверхность; $F_{тр.б} = N \cdot f'$.

Стопорные элементы имеют сравнительно небольшую массу, поэтому с небольшой погрешностью в расчетах можем не учитывать усилия $F_{тр.б}$, $F^и$ и N .

В соответствии с принципом Даламбера составим сумму проекций системы сил, действующей на стопорный элемент, на ось x :

$$\left. \begin{aligned} R'_x - F'_{тр} \cdot \cos \alpha - F_{упр} &= 0, \\ R'_x - R' \cdot f \cdot \cos \alpha - c \cdot S &= 0, \\ R'_x - \frac{R'_x}{\sin \alpha} \cdot f \cdot \cos \alpha - c \cdot S &= 0, \\ R'_x &= \frac{c \cdot S}{1 - \operatorname{ctg} \alpha f}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

С учетом (3.20) выражение (3.19):

$$-F_{дв} + \frac{c \cdot S}{\operatorname{tg} \alpha \cdot (1 - \operatorname{ctg} \alpha f)} + m_{п.о.} \cdot \alpha + \frac{c \cdot S \cdot f}{(1 - \operatorname{ctg} \alpha f)} + F_{соп} - G_{п.о.} = 0.$$

Тогда

$$F_{\text{дв}} = c \cdot S \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f} + \frac{1}{1/f - \operatorname{ctg} \alpha} \right) + m_{\text{р.о.}} \cdot \alpha + F_{\text{сопр}} - G_{\text{р.о.}} \quad (3.21)$$

Таким образом, на силу $F_{\text{дв}}$ оказывают влияние конструктивные особенности стопорных элементов, режим работы комбинированного якоря ЛЭМД и составляющие силы сопротивления перемещению рабочего органа.

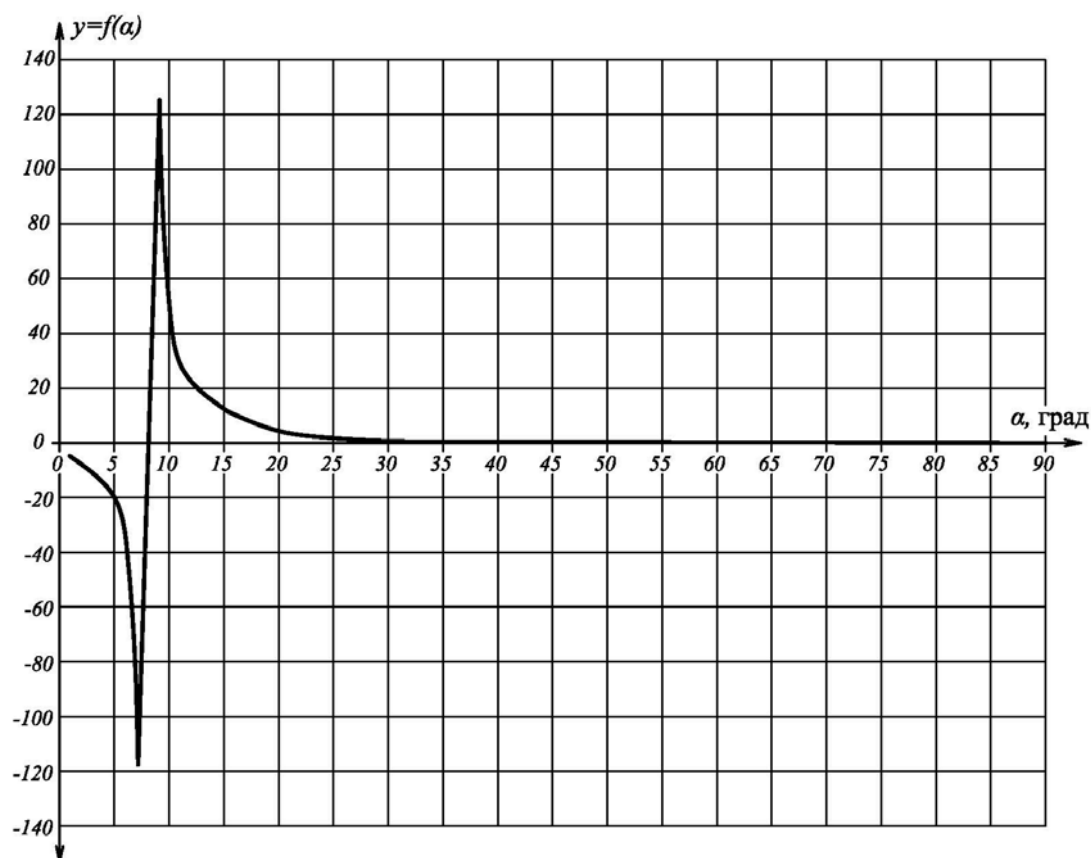


Рис.3.14 – График функции $y = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f} + \frac{1}{1/f - \operatorname{ctg} \alpha}$

Для оценки влияния угла наклона α рабочей поверхности стопорных элементов на значение $F_{\text{дв}}$, на рис.3.14 представлен график зависимости вида

$$y = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - f} + \frac{1}{1/f - \operatorname{ctg} \alpha} \text{ на интервале } 0^\circ < \alpha < 90^\circ.$$

Таким образом, сила $F_{\text{дв}}$ уменьшается с ростом величины угла α . При $\alpha > 35^\circ$ значение $F_{\text{дв}}$ не меняется.

Для использования ЛЭМД в приводе пресса, например, для отжима сока, предложена конструкция двигателя с дискретным поступательным неограничен-

ным движением исполнительного органа, конструкция которого показана на рис.3.15 [171,181,199].

Шаговый ЛЭМД содержит статор 9, в расточке которого помещена обмотка 7, комбинированный якорь 6 с дисковой частью 5, возвратную пружину 8 и направляющий корпус 2. Комбинированный якорь 6 с дисковой частью 5 имеет сквозной осевой канал, в который помещена зубчатая штанга 1. Для осуществления дискретного однонаправленного перемещения штанги служат подающие 3 и удерживающие 10 стопорные элементы (собачки), смонтированные, соответственно на якоре 5 и статоре 9 двигателя и выполненные в виде плоских, радиально подвижных секторов, которые в рабочем состоянии поджаты пружинами 4, 11 к зубчатой штанге 1. Механизмы размыкания стопорных элементов 3 (собачек), 10, обеспечивающие свободное (нерабочее) перемещение штанги 1 относительно и якоря 5, 6, и двигателя в любом направлении, на чертеже не показаны [199,201].

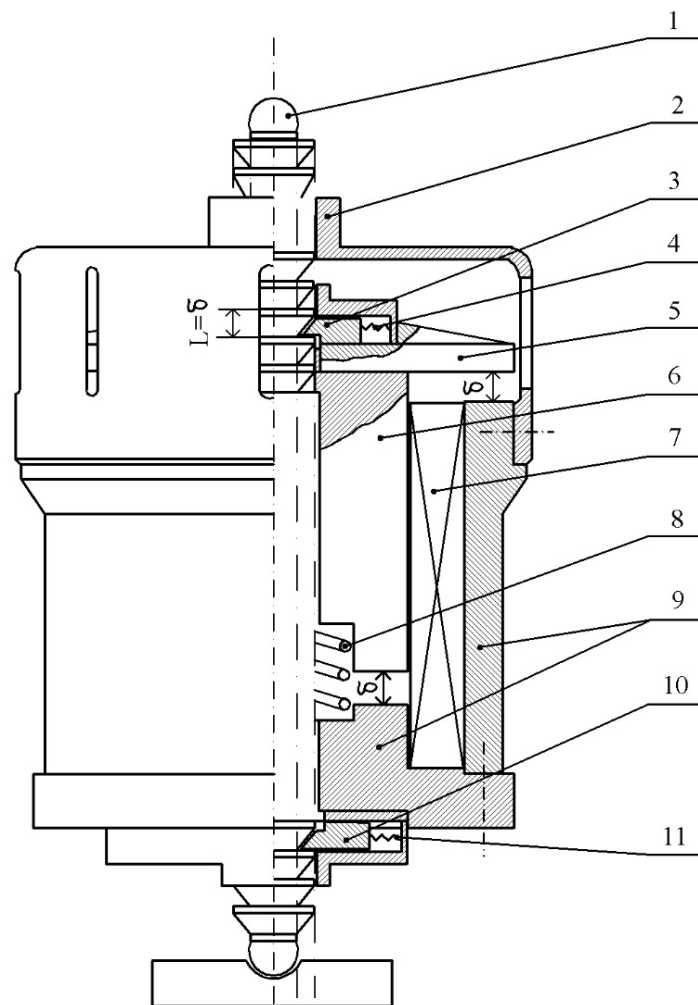


Рис.3.15 – Конструкция шагового ЛЭМД с дискретным поступательным неограниченным движением исполнительного органа.

В исходном состоянии якорь 6 под действием возвратной пружины 8 находится в крайнем верхнем положении. Подающие 3 и удерживающие 10 собачки находятся в зацеплении с зубчатой штангой 1, поскольку поджаты к ней пружинами 4 и 11.

При подключении обмотки 7 к источнику питания якорь 6 под действием электромагнитной силы втягивается в обмотку, сжимая возвратную пружину 8 и перемещая с помощью собачек 3 зубчатую штангу 1 в осевом направлении. Возникающие при этом между контактирующими конусными поверхностями зубьев штанги 1 и собачек 10 тангенциальные, направленные радиально, усилия преодолевают действие пружин 11 и раздвигают собачки 10, которые, таким образом, не препятствуют перемещению штанги 1. После полного втягивания якоря 6 в обмотку 7 на величину δ и осевого перемещения штанги 1 на один шаг $L=\delta$ собачки 10 под действием пружин 11 вновь входят в зацепление с очередным зубом штанги 1.

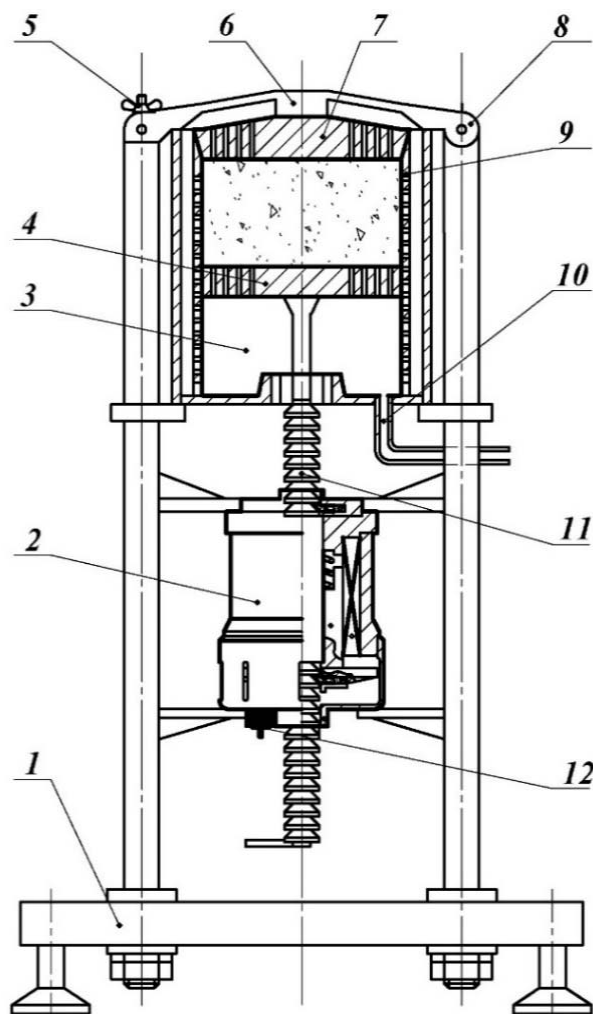


Рис.3.16 – Конструкция пресса для отжима сока с шаговым ЛЭМД.

При отключении обмотки 7 штанга 1, удерживаемая элементами 10, остается неподвижной, а якорь 5, 6 под действием возвратной пружины 8 перемещается в исходное положение. Теперь радиальные усилия возникают между конусными поверхностями зуба штанги 1 и собачек 3, которые раздвигаются, сжимая пружины 4, и не препятствуют возврату якоря 5, 6. Как только якорь, переместившись на величину $L=\delta$, займет исходное положение, пружины 4 обеспечат зацепление собачек 3 с очередным зубом штанги 1. Далее циклы повторяются и, таким образом, происходит дискретное, поступательное, ограниченное лишь длиной штанги 1, движение рабочего органа.

В предлагаемом двигателе фиксация отработанного штангой 1 перемещения осуществляется механическими устройствами 10, что позволяет питать обмотку кратковременными импульсами тока лишь во время движения штанги, а по окончании движения отключить от источника. Это снижает потери и нагрев обмотки 7 и повышает экономичность устройства.

Конструкция пресса для отжима сока с шаговым ЛЭМД схематично представлена на рис.3.16. Процитируем подробно особенности установки в соответствии с [221]. «В станине 1 установлен шаговый ЛЭМД с дискретным перемещением рабочего органа 2, зубчатая штанга 11 которого жестко соединена с отжимным поршнем 4, линейно перемещающимся вдоль стенок 9 отжимной камеры 3, до дожимной плиты 7. Конструкция устройства снабжена откидной крышкой 6 с замком 5 закрепленной на станине 1 при помощи поворотной петли 8. Шаговый ЛЭМД 2 осуществляет дискретное, поступательное, ограниченное срабатыванием конечного выключателя 12, движение зубчатой штанги 11 с поршнем 4, сжимающим загруженную в камеру 3 плодовую мезгу. Создаваемое поршнем 4 давление на плодовую мезгу образует сок, вытекающий через перфорацию стенок камеры 3, дожимной плиты 7, самого поршня 4 и сокоотсекатель 10 в емкость (на рис.3.21 не показана). По окончании цикла прессования при помощи откидной крышки 6 производится удаление выжимок из камеры 3, а также, при необходимости, очистка деталей и узлов, контактирующих с прессуемой массой».

3.2.3 Устройство клипсования упаковки сельхозпродукции

Конструкция электромагнитного клипсатора с ЛЭМД в значительной степени определяется видом расходного материала – алюминиевая (пластиковая) смотанная в рулон лента, из которой формируется клипса (скоба), либо готовые металлические П-образные клипсы [188,223,236,247].

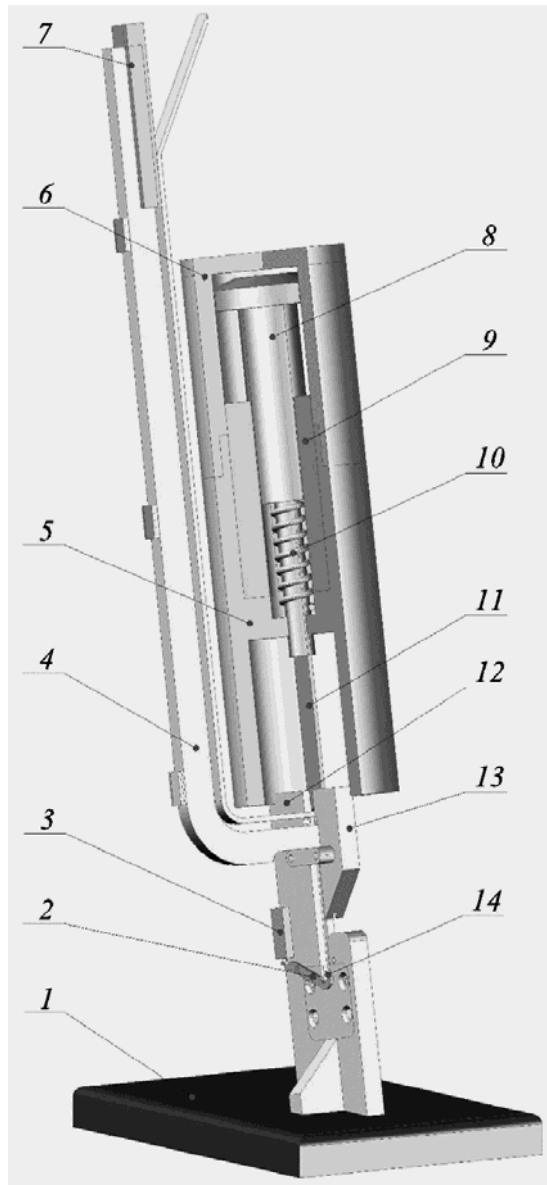


Рис.3.17 – Клипсатор с дискретным ЛЭМД для наложения готовых металлических скоб на упаковку запечатываемого продукта.

Устройство с дискретным ЛЭМД для наложения готовых металлических П-образных скоб на концы упаковок сельхозпродукции, например, колбасных и хлебобулочных изделий, представлено на рис.3.17 [188,236].

Клипсатор содержит цилиндрический статор 5 с верхней крышкой 6, обмотку 9, комбинированный якорь 8, сочлененный с толкателем 11, скользящим по направляющим 12 и 13, возвратную пружину 10, магазин П-образных металлических скоб 4 и груз 7 магазина, матрицу 14, концевой выключатель 3 с толкателем 2, основание 1.

В исходном состоянии якорь 8 поджат пружиной 10 к верхней крышке 6 цилиндрического статора 5. Оболочка запечатываемого продукта подается в рабочую зону матрицы 14, воздействуя на толкатель 2 концевой выключателя 3. При подаче в обмотку 9 питающего электрического импульса напряжения якорь 8 с толкателем 11 под действием электромагнитной силы, сжимая пружину 10, перемещается по направляющим 12 и 13 и совершает рабочий ход. Толкатель 11 обеспечивает подачу из магазина 4 и обжатие в матрице 14 П-образных металлических скоб. Окончание технологической операции клипсования совпадает с окончанием питающего импульса напряжения на обмотке 9 электромагнитного двигателя. Под действием запасенной механической энергии в возвратном упругом элементе 10 якорь 9 возвращается в исходное положение. Далее цикл повторяется [188,236].

3.2.4 Устройство для шприцевания колбасного фарша

На рис.3.18 схематично представлена конструкция устройства для наполнения колбасных оболочек фаршем [78,194], которое содержит корпус-статор 1, крышку 2, обмотку 6, цилиндрический якорь 5 с плоской дисковой частью 3, цилиндрическую пружину 4 и направляющую 9. Шприц размещается на станине 7.

В бункер 13 загружается фарш. В обмотку 6 подается напряжение. Якорь 4 втягивается в обмотку 1 под действием электромагнитной силы, сжимая возвратную пружину 4 и перемещая толкатель 8 с фаршевым поршнем 10.

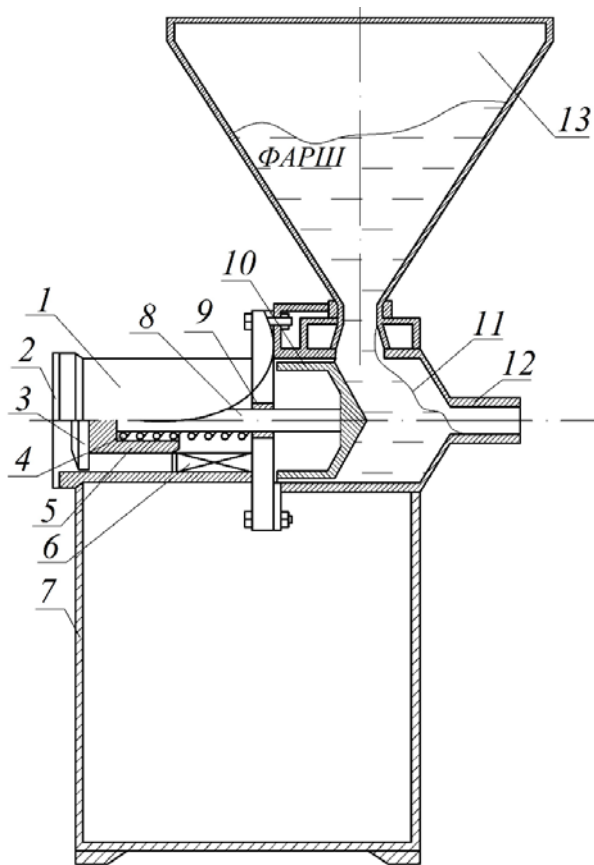


Рис.3.18 – Конструкция устройства для наполнения колбасных оболочек фаршем.

Под давлением фарш заполняет в цевку 12, на которую надета оболочка. После наполнения оболочки питание обмотки прекращается и якорь силой сжатой пружины возвращается в исходное положение и цикл повторяется.

3.3 Выводы по третьей главе

Интегрирование в моноконструкцию ЛЭМД-привода и зажимного механизма со сферическими, взамен острооребранных конусных, поперечно-заклинивающими на рабочем ходе δ в осевом канале инструмент или рабочий орган элементами расширяет области эффективного применения, обеспечивая использование привода для одно- или попеременного двунаправленного перемещения S инструмента, многократно $n\delta$, $n=1,2,\dots$, превышающего рабочий зазор и ход δ якоря двигателя $S=n\delta$ и увеличивая ресурс инструмента.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛЭМД-ПРИВОДОВ

Для формирования униполярных питающих импульсов напряжения и тока двигателей ударных и безударных ЛЭМД-приводов служат электрические преобразователи, подробно представленные в работах [8,37,83,105,106,110,124,128,131,149,167,168,195,196,222,230,235], на основе которых составлена классификационная схема, показанная на рис.4.1.



Рис.4.1 – Классификация электрических преобразователей ЛЭМД-приводов.

Рассмотрим подробнее особенности схемотехнического построения таких преобразователей.

4.1 Принципы построения электрических преобразователей ЛЭМД-приводов

4.1.1 Преобразователи, подключаемые к автономному источнику питания

При эксплуатации машин с ЛЭМД, например, устройств для погружения стержневых элементов в грунт, в полевых условиях и на объектах без элект-

троснабжения, их питание осуществляется от автономного источника. Для питания автономных ЛЭМД-приводов могут использоваться дизель-генераторные установки, бензоагрегаты и химические источники тока, например, аккумуляторы [21,28,33,35,63,195,196]. Для источника энергии ЛЭМД-приводы представляют импульсную нагрузку. Таким образом, свойства автономных источников в значительной мере определяют выходные показатели всего ЛЭМД-привода.

В частности, автономные источники электропитания переносных ЛЭМД-приводов, например, для погружения стержневых элементов в грунт, должны обеспечивать следующие требования:

- высокие удельные показатели; ручная переноска к месту работы;
- работа в импульсном режиме;
- быстрая подготовка к работе;
- обеспечение требуемой продолжительности работы ЛЭМД-привода;
- работа в заданных условиях окружающей среды;
- удобство размещения на средствах доставки к объекту.

Сравнительный анализ используемых в настоящее время автономных источников электроэнергии подтвердил, что, в целом, сформулированным требованиям соответствуют мобильные агрегаты с электромашинными преобразователями (ЭМУ) и химические источники тока (ХИТ) [195,196].

Для сопоставления ЭМУ и ХИТ воспользуемся значениями их КПД η . Проведенные сравнения [195,196] показывают, что значения η у ХИТ достигают до 80 %, тогда как лучшие из тепловых машин имеют КПД до 45 %.

Табл.4.1 – Удельные показатели автономных источников питания с ЭМУ и ХИТ

Показатель	Передвижные электроустановки		Аккумуляторы (химические источники тока)			
	Мощность до 10 кВт	Мощность до 100 кВт	Никель-кадмиевые		Свинцовые	
КПД	до 45 %	до 45 %	60...80 %		60...80 %	
Удельная мощность	50 Вт/кг	60 Вт/кг	$j_p < 0,05$	500 Вт/кг	$j_p < 0,05$	200 Вт/кг
				1000 кВт/м ³		400 кВт/м ³
	13 кВт/м ³	20 кВт/м ³	$j_p = 1$	150 Вт/кг	$j_p = 1$	90 Вт/кг
				300 кВт/м ³		180 кВт/м ³

Сравнение электрических и других показателей автономных источников питания удобнее всего сделать, используя удельные показатели, представленные для сравниваемых ЭМУ и ХИТ в табл.4.1.

Для сопоставления химических источников тока приняты к рассмотрению никель-кадмиевые и свинцовые электрохимические системы. Так как удельные показатели ХИТ, в том числе, зависят от условий разряда, в табл.5.1 представлены показатели для длительного ($j_p < 0,05$) и форсированного ($j_p = 1$) режимов работы источника [196]. Таким образом, из табл.4.1 следует, что удельные показатели ХИТ в 1,5...50 раз превышают характеристики ЭМУ, что свидетельствует о перспективности использования химических источников тока при автономном электропитании ЛЭМД-приводов. Наиболее полно сравнительный анализ химических источников тока представлен в [195,196], где доказано, что для питания машины с ЛЭМД целесообразно использовать вторичные элементы – аккумуляторы, например, свинцовые кислотные, обладающие малым внутренним сопротивлением, высокими удельными емкостью и мощностью, большой отдачей по емкости, приемлемым ресурсом и сроком службы, а также простотой обслуживания и эксплуатации.

Рассмотрим несколько типов электрических преобразователей, подключаемых к аккумуляторным источникам питания, основные элементы которых представлены структурной схемой на рис.4.2 [10,195,196]. Дозирование энергии, передаваемой аккумулятором в обмотку ЛЭМД, производится либо тиристорным, либо транзисторным прерывателем постоянного тока (ППТ). Применение тиристоров в качестве бесконтактных коммутационных аппаратов значительно усложняет схему, что приводит к увеличению габаритов и массы ЭП [196,264]. Широкое распространение в силовой импульсной электронике получили транзисторы *MOSFET* и *IGBT*, обладающие следующими явными преимуществами: полной управляемостью, малыми габаритами и массой; надежностью; работоспособностью при низких температурах; мгновенным запуском; высоким КПД; малой стоимостью; небольшими эксплуатационными расходами [153,195,243].

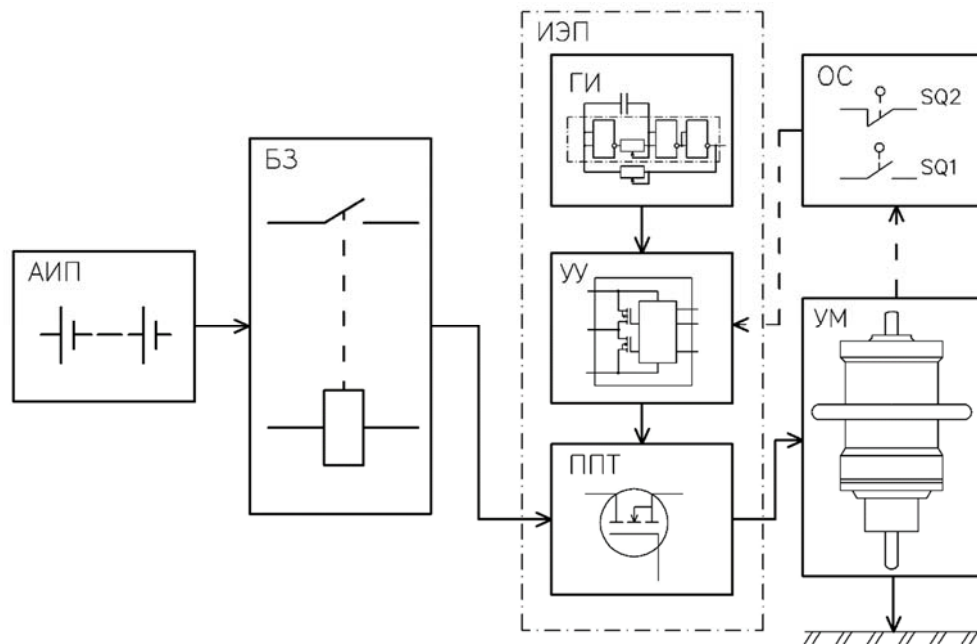


Рис.4.2 – Структурная схема электрического преобразователя с аккумуляторным питанием ЛЭМД: АИП-аккумуляторный источник питания, БЗ – блок защиты, ИЭП – импульсный электрический преобразователь, ГИ – генератор импульсов, УУ – устройство управления, ППТ – прерыватель постоянного тока, ОС – обратная связь по положению якоря, УМ – ударная машина с ЛЭМД.

В общем случае ППТ состоит из одного или нескольких коммутационных элементов (КЭ) – транзисторов и схемы их управления. Периодическое включение КЭ прерывателя формирует в обмотке ЛЭМД машины для погружения электродов в грунт силовые питающие импульсы тока с требуемыми параметрами.

Включение и выключение КЭ увязывается с началом и окончанием рабочего хода бойка УМ. Необходимую последовательность переключений прерывателя в соответствии с выбранным алгоритмом управления движением бойка машины осуществляет устройство управления УУ (рис.4.2). Аккумуляторный источник питания обладает значительным запасом энергии и малым внутренним сопротивлением. При возникновении аварийных режимов работы резко возрастает ток, что приводит к выходу из строя самого источника и элементов электрического преобразователя. Поэтому обязателен блок защиты БЗ (рис.4.2), который обеспечивает механическое отключение силовой цепи [195,196].

Для преобразователей, подключаемых к аккумуляторным источникам питания, характерным является: сравнительно низкое напряжение питания до

100 В и большие коммутируемые токи до 150 А; широкий диапазон изменения входного и выходного напряжений; резкое понижение напряжения источника питания при больших токах нагрузки и разряде аккумуляторной батареи; активно-индуктивная нагрузка с противо-ЭДС.

С учетом особенностей разработана схема электрического преобразователя ЛЭМД ударной машины с управлением в функции времени (рис.4.3,а), в котором моменты отпираания и запираания транзистора не зависят друг от друга, а определяются схемой УУ и синхронизированы с началом – окончанием рабочего хода якоря.

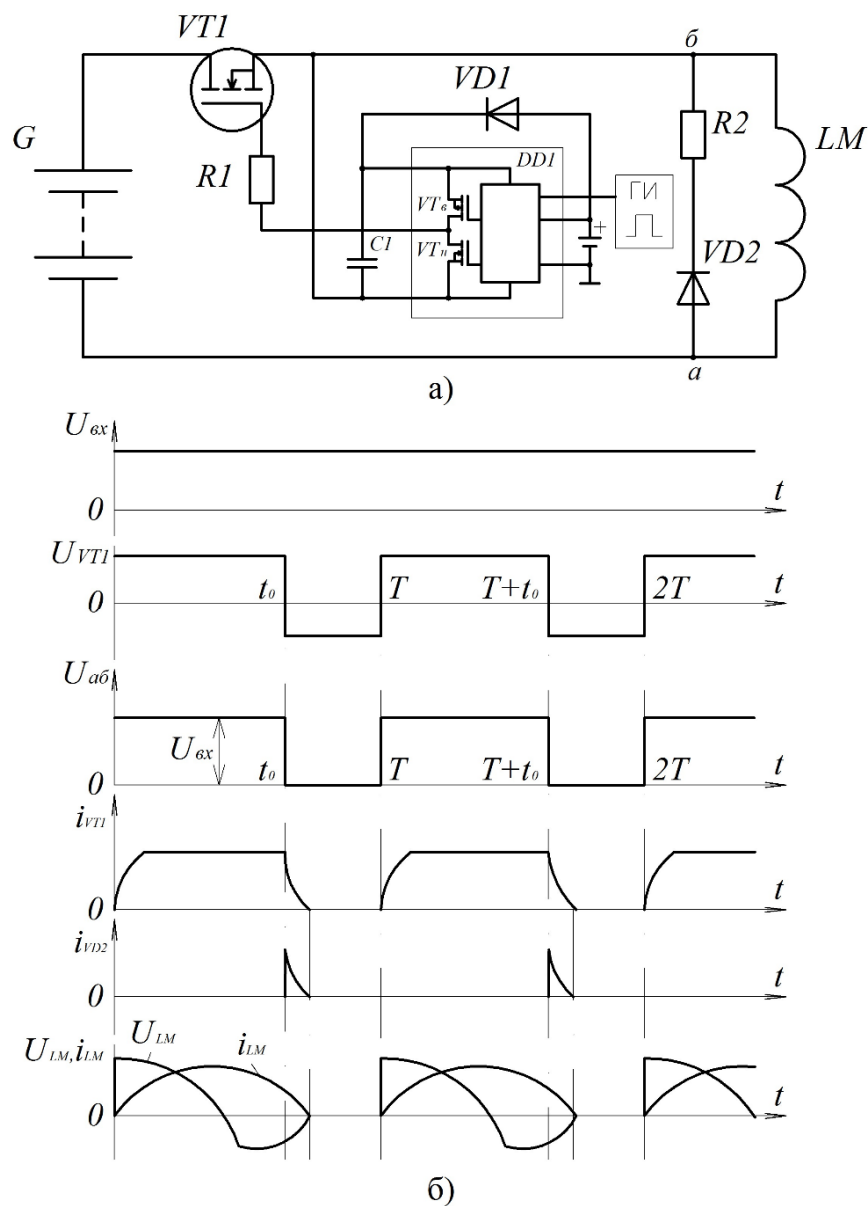


Рис.4.3 – Схема ЭП для питания ударной машины от аккумуляторного источника питания с управлением в функции времени (а) и временные диаграммы (б).

Силовая часть ЭП включает в себя мощный транзистор *MOSFET VT1*, аккумуляторный источник питания *G* и обмотку *LM* ЛЭМД [243].

Устройство управления УУ содержит микросхему *DD1*, в которой применена защита от пониженного напряжения питания, и формирователь импульсов *ФИ*, построенный на основе триггера Шмитта, который генерирует сигнал стандартной амплитуды логического уровня.

Заряд, накапливаемый в конденсаторе *C1* (рис.4.3,а), имитирует источник, который питает управляющую микросхему *DD1*. Источник питания в динамическом режиме заменяется конденсатором соответствующей емкости, подзаряжающимся от источника питания этой микросхемы [153,195,243].

Это позволяет при открытом транзисторе *VT_н* диоду *VD2* подзаряжать конденсатор *C1*. Когда транзистор нижнего плеча *VT_н* закрывается и начинает открываться транзистор *VT_в*, диод *VD2* заперт. Разряд конденсатор *C1* через транзистор верхнего плеча *VT_в* отпирает транзистор *VT1*, подключает обмотку *LM* к источнику и обеспечивает срабатывание якоря ЛЭМД.

В момент окончания рабочего хода ЛЭМД транзистор нижнего плеча *VT_н* микросхемы *DD1* переключается в открытое состояние, а транзистор верхнего плеча *VT_в*, соответственно, закрывается, что приводит к запираанию транзистора *VT1*. Циклы повторяются [153,195].

При несоответствующем значении емкости конденсатор *C1* может не успевать заряжаться, поэтому величину емкости следует рассчитывать. Основными факторами, влияющими на разряд конденсатора *C1* являются: величина заряда затвора $Q_{зVT1}$ транзистора *VT1*; ток потребления выходного каскада управляющей микросхемы *DD1* в статическом режиме I_{DD1} ; циклическое изменение заряда этой микросхемы *DD1* Q_3^l ; ток утечки затвора транзистора *VT1* I_{yVT1} ; ток утечки конденсатора *C1* I_{yC1} [153].

Минимальный заряд конденсатора *C1* Q_{minC1} определяется из выражения:

$$Q_{minC1} = 2Q_{зVT1} + \frac{I_{DD1}}{f} + Q_3' + \frac{I_{yC1}}{f} + \frac{I_{yVT1}}{f} \quad (4.1)$$

где f – частота коммутаций.

Так как величина токов утечки затвора транзистора $VT1$ I_{yVT1} и конденсатора CI I_{yCI} мала, то перечисленными факторами можно пренебречь. С учетом (4.1) представим выражение для определения емкости конденсатора CI [153]

$$Q \geq \frac{2 \left(2Q_{3VT1} + \frac{I_{DD1}}{f} + Q'_3 \right)}{(U_{numDD1} - U_{VD2})}, \quad (4.2)$$

где U_{numDD1} – напряжение питания микросхемы $DD1$; U_{VD2} – падение напряжения на диоде $VD2$; f – частота коммутаций.

Временные диаграммы, поясняющие работу электрического преобразователя, представлены на рис.4.3,б.

Характерным для данного ЭП с управлением в функции времени является отсутствие специальных датчиков, фиксирующих положение рабочего органа ударной машины, что позволяет отказаться от контрольного кабеля, который соединяет датчики на электромагнитной машине и электрический преобразователь, и повысить надежность.

Недостаток этого способа управления состоит в том, что затруднительно обеспечить режим максимальной производительности и экономичности работы ЛЭМД-привода.

Наибольшая частота ходов ЛЭМД, его максимальная мощность и производительность обеспечивается в автоколебательном, близком к резонансному, режиме работы с управлением в функции положения якоря, который реализуется датчиками обратной связи, размещенными на двигателе.

Принципиальная электрическая схема ЭП с управлением в функции положения якоря ЛЭМД представлена на рис.4.4,а. Включение электрического преобразователя осуществляется нажатием кнопки $SB2$, отключение по окончании работы – нажатием кнопки $SB1$. Управление работой машины производится тумблером SA , расположенным на двигателе.

Для отключения электромагнитного привода при возникновении аварийных режимов работы предусмотрена токовая защита, чувствительным элементом которой является шунт $R2$.

Повышение тока в силовой цепи ведет к открыванию транзистора $VT3$, протекающий ток через управляющий электрод тиристора $VS2$, отпирает его. Возникает излучение светодиода тиристорного оптрона $U1$, засвеченный фототиристор, включенный в цепь управления тиристора $VS1$, открывается. Благодаря включению $VS1$ происходит механическое размыкание силовой цепи контактором KM .

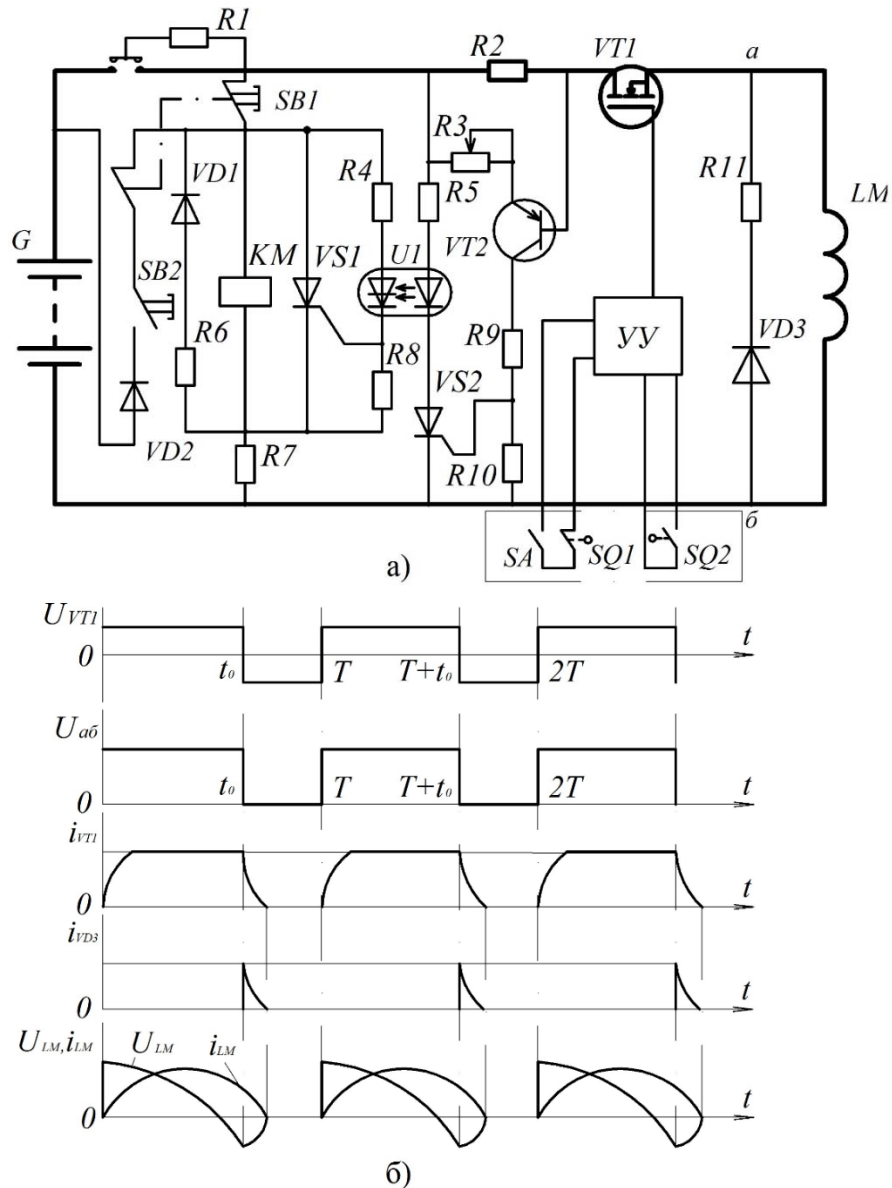


Рис.4.4 – Схема ЭП для питания ЛЭМД от аккумуляторного источника питания с управлением в функции положения рабочего органа (а) и временные диаграммы (б).

Силовая часть ЭП представлена аккумуляторным источником питания G , обмоткой LM ЛЭМД и прерывателем постоянного тока на транзисторе $VT1$.

Управление работой ЭП производится с помощью датчиков верхнего уровня $SQ1$ и нижнего уровня $SQ2$.

После нажатия кнопки $SB2$ и замыкания контактов KM при включенном тумблере SA отпирается транзистор $VT1$, так как контакт датчика верхнего положения $SQ1$ замкнут. По обмотке LM начинает протекать ток, который создает магнитное поле, разгоняющее якорь УМ. Контакт датчика нижнего уровня $SQ2$ замыкается, формируются сигналы на запираание транзистора $VT1$. Остаточная энергия магнитного поля частично рассеивается на диоде $VD3$ и резисторе $R11$. Под действием упругого элемента якорь УМ возвращается в исходное положение, контакт датчика верхнего положения бойка $SQ1$ замыкается и цикл повторяется.

Достоинством данной схемы электрического преобразователя с управлением в функции положения рабочего органа является автоматическая самонастройка электромагнитной машины, учитывающая изменение условий работы – разряженность источника питания, температуру окружающей среды и др. [195,196].

Оценка теплового состояния силового каскада ЭП является одним из важнейших этапов процесса разработки и позволяет подтвердить правильность выбора и применения прерывателя постоянного тока ППТ на транзисторе MOSFET и убедиться в надежности работы устройства.

Поскольку полевые транзисторы не имеют вторичного пробоя, то для оценки его теплового состояния воспользуемся рекомендациями [153].

Транзистор выбран правильно, если выполняется условие [153,195]:

$$\Theta_{n.per} \leq \Theta_{n.don}, \quad (4.3)$$

где

$$\Theta_{n.per} = t_n - t_{окр}; \quad \Theta_{n.don} = t_{n.макс} - t_{окр} \quad (4.4)$$

– соответственно температура перегрева перехода действительная и максимально допустимая по сравнению с наибольшей температурой окружающей среды $t_{окр}$, t_n – температура переходов.

Если

$$P_n \leq P_{n.\dot{don}}, \quad (4.5)$$

где P_n – полная рассеиваемая мощность; $P_{n.\dot{don}}$ – максимально допустимая мощность рассеяния прибора при наибольшей окружающей температуре, то автоматически выполняется условие (4.3).

Полная мощность P_n потерь в транзисторе [264]:

$$P_n = P_{nep} + P_{np} + P_{ynp} + P_{ym}, \quad (4.6)$$

где P_{nep} , P_{np} , P_{ynp} , P_{ym} – потери мощности соответственно при коммутации, в активном сопротивлении, в цепи управления, за счет тока утечки.

Потери мощности, вызванные током утечки P_{ym} пренебрежимо малы, поэтому их учитывать не имеет смысла. Кроме того, одно из главных преимуществ полевого транзистора – это исчезающе малые потери в цепи его управления P_{ynp} [264], поэтому потерями на управление также пренебрежем. Тогда выражение (4.6) примет вид:

$$P_n = P_{nep} + P_{np} \quad (4.7)$$

Оценим составляющие уравнения (4.7) следующим образом [153]:

$$P_{np} = R_{cu} I_{c(\partial)}^2, \quad (4.8)$$

где R_{cu} – сопротивление транзистора в открытом состоянии; $I_{c(\partial)}$ – действующее значение тока стока.

Для импульсов тока прямоугольной формы среднеквадратическое значение $I_{c(\partial)}$ определяется по выражению [153]:

$$I_{c(\partial)} = I_1 \sqrt{\chi}, \quad (4.9)$$

где $\chi = \tau/T$ – скважность импульсов; τ – длительности импульса; T – период следования импульсов; I_1 – максимальное значение тока.

Потери мощности при переключении P_{nep} определяются по условию режима работы транзистора. Так как в качестве нагрузки используется обмотка ЛЭМД с индуктивностью L , то режим полагается «тяжелым». В этом случае величина P_{nep} рассчитывается по формуле [153]:

$$P_{nep} = (U_n i_{c(\partial)} t_f f) / 2, \quad (4.10)$$

где U_n – напряжение питания; $i_{c(o)}(t) = U_n t / L$ – действующее значение тока стока; t_f – время выключения; f – частота переключений транзистора; L – индуктивность обмотки ЛЭМД.

Полученное значение полной мощности P_n , выделяющейся в транзисторе во время его переключения, сравнивают с максимально допустимой мощностью рассеяния выбранного элемента. Если выполняется условие (4.5), то температура перехода не превысит максимально допустимую.

Если неравенство (4.5) не выполняется, то транзистору нужен теплоотвод (радиатор). Перегрев перехода в этом случае определяется соотношением

$$\Theta_{n,пер} = \Delta t_{нк} + \Delta t_{кр} + \Delta t_{рс} = P_n R_{м.нк} + P_n R_{м.кр} + P_n R_{м.рс}, \quad (4.11)$$

где $\Delta t_{нк}$, $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{рс}$ – разности температур соответственно между переходом и корпусом прибора, корпусом и радиатором, радиатором и окружающей средой; $R_{м.нк}$, $R_{м.кр}$, $R_{м.рс}$ – тепловые сопротивления на границах между теми же элементами. Тепловое сопротивление численно равно превышению температуры в градусах Цельсия на 1 Вт выделяемой мощности [264].

В технической документации на транзисторы обычно приводятся нормированные переходные характеристики теплового сопротивления «переход – корпус» $R_{м.нк}$, которое в значительной степени зависит от совокупности параметров [153].

Сопротивление $R_{м.кр}$ определяется [264] контактом между корпусом и радиатором (класс обработки поверхности, наличие изоляционных прокладок и спецсмазок и др.) и колеблется в пределах 0,3 – 1,5 °C/Вт.

Для определения теплового сопротивления «радиатор – среда» воспользуемся выражением [264]:

$$R_{м.рс} = 1 / \alpha_k S_o, \quad (4.12)$$

где S_o – поверхность охлаждения; α_k – коэффициент теплоотдачи.

Подробный расчет теплового режима транзисторов изложен в [153].

4.1.2 Электрические преобразователи с емкостными накопителями энергии

Характеристики машины с ЛЭМД и источников электропитания, как правило, не согласованны. Большинство используемых на практике устройств электропитания не рассчитано на импульсный отбор мощности. При этом индуктивный характер нагрузки оказывает негативное влияние на источник питания и другие потребители, ухудшает качество электроэнергии. Тогда представляется необходимым дополнить АИП емкостным (конденсаторным) накопителем энергии. Это позволяет, например, для электролитических конденсаторов, добиться запасаемой и удельной запасаемой энергии до 100 кДж и 50...60 Дж/г соответственно.

Преимущества этих накопителей по разрядной мощности, по влиянию на показатели аккумуляторного источника энергии подробно рассмотрены в [32,37,161,195,196,256,257,296].

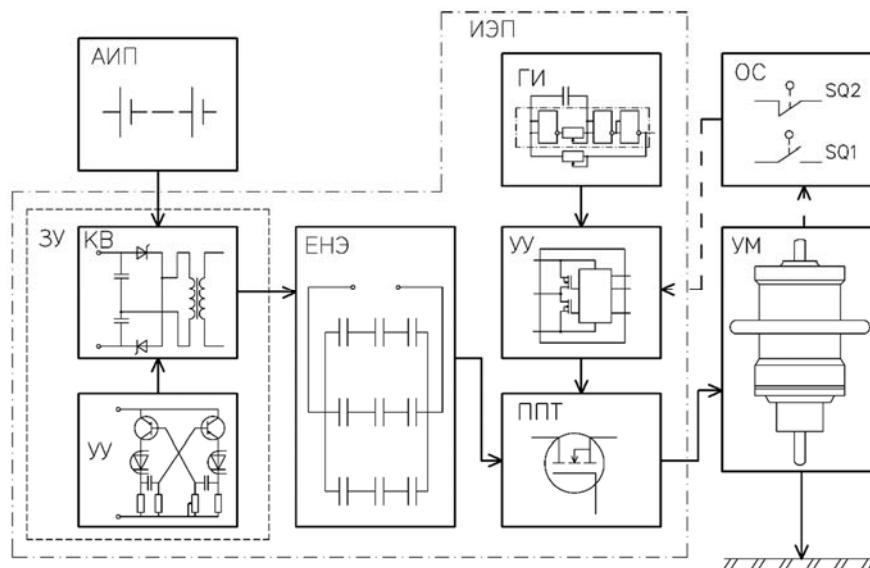


Рис.4.5 – Структурная схема электрического преобразователя с емкостным накопителем энергии: АИП – аккумуляторный источник питания, ЗУ – зарядное устройство, КВ – преобразователь напряжения, ЕНЭ – емкостной накопитель энергии, ИЭП – электрический преобразователь, УУ – устройство управления, ППТ – прерыватель постоянного тока, ОС – обратная связь, УМ – ударная машина с ЛЭМД

Примерная функциональная схема электрического преобразователя с накопителем показана на рис.4.5. Схема содержит: электромагнитную ударную машину УМ, аккумуляторный источник питания АИП, электрический

преобразователь ЭП, емкостный (конденсаторный) накопитель энергии ЕНЭ. Энергетическая часть преобразователя включает три связанные между собой функциональные группы: емкостный накопитель ЕНЭ, зарядное устройство ЗУ и прерыватель тока ППТ. Эти элементы согласуют характеристики аккумуляторного источника и двигателя, обеспечивая одновременно относительно равномерное нагружение сравнительно небольшой мощностью АИП и импульсную, с большой мощностью, передачу энергии в ЛЭМД. Зарядное устройств ЗУ содержит DC/DC-преобразователь КВ, рассмотренный, например, в [195,196].

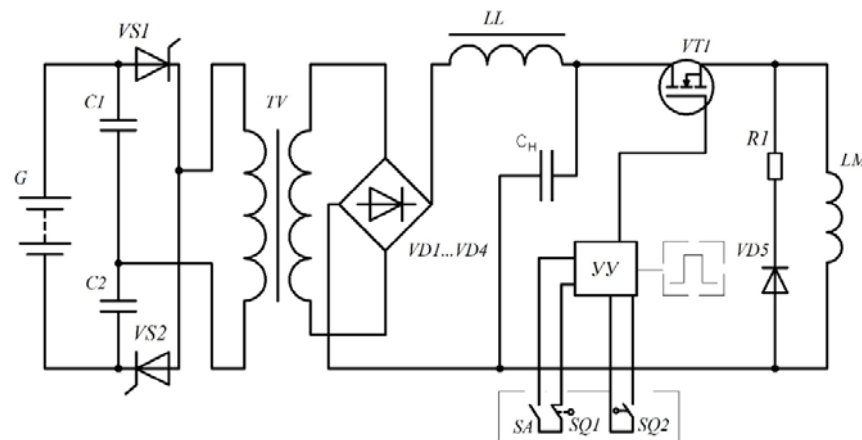


Рис.4.6 – Электрическая схема преобразователя с емкостным накопителем энергии.

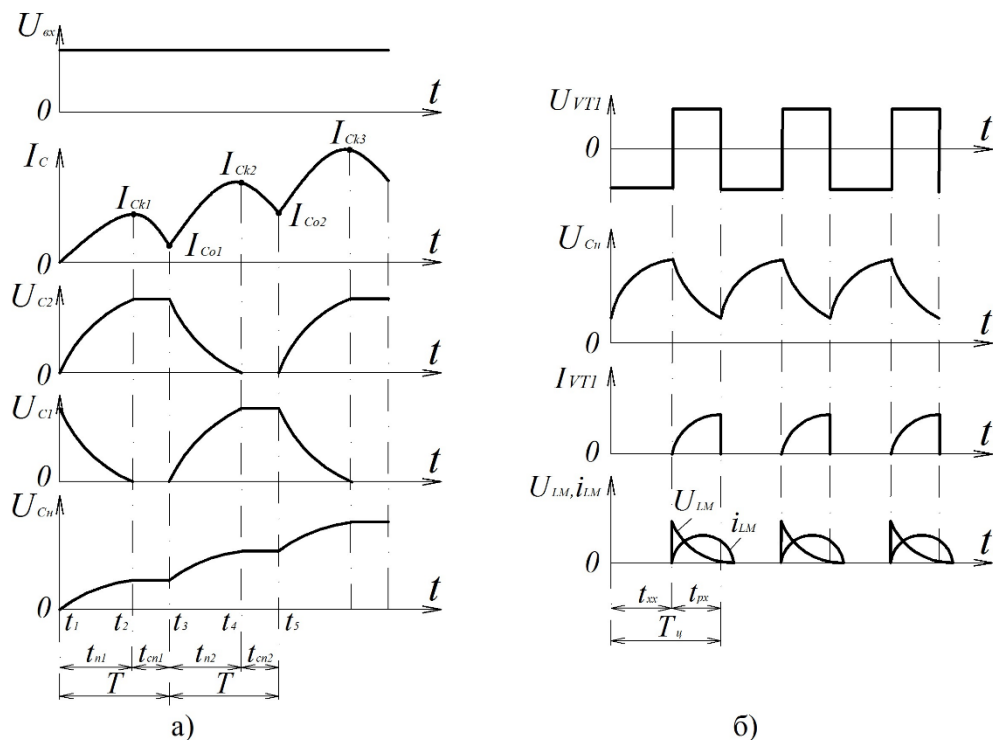


Рис.4.7 – Временные диаграммы процессов для зарядного устройства (а) и электрического преобразователя (б).

На рис.4.6 для примера приведена принципиальная схема электрического преобразователя для управления машиной с ЛЭМД, особенности которого рассмотрены в [88,241,242]. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя приведены на рис.4.7.

Напряжение на конденсаторной батарее C_n увеличивается в течение времени интервалов $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$, $t_5 \dots$ при переменном отпирании ключей $VS1$ и $VS2$ и заряде-разряде конденсаторов $C2$, $C1$.

Восстановление непроводящего состояния тиристора совпадает с моментом t_{cn} уменьшения тока до нуля и сопровождается передачей энергии $W_{эл} = 0,5C1U_{ex}^2$ в зарядный контур. При этом напряжение на конденсаторе C_n возрастает дискретно.

При анализе процессов в режиме непрерывного зарядного тока необходимо учитывать начальные значения токов на каждом зарядном импульсе.

Взаимосвязь процессов в преобразователе определяется временными и электрическими показателями [161,257]:

$$W_{Ck} = \frac{1}{2} (C_{\text{э}} U_{\text{ex}}^2 (k-1) - I_{CO(k-1)}^2 L); \quad (4.13)$$

$$U_{Ck} = \sqrt{\frac{C_{\text{э}}}{C_n U_{\text{ex}} (k-1) - I_{CO(k-1)}^2 L}}, \quad (4.14)$$

$$t_{nk} = \tau_{\text{э}} \left[\frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{I_{CO(k-1)} \rho_{\text{э}}}{U_{\text{ex}} U_{Ck}} \right) - \arctg \left(\frac{I_{CKk}}{U_{Ck}} \right) \right], \quad (4.15)$$

$$t_{cnk} = T - t_{nk}, \quad (4.16)$$

$$i_{Lk} = U_{\text{ex}} \sqrt{\frac{C_{\text{э}k}}{L}}, \quad (4.17)$$

где W_{Ck} , U_{Ck} – энергия и напряжение заряда конденсаторного накопителя на k -м импульсе; $C_{\text{э}} = C1 + C2$ – эквивалентная емкость; t_{nk} – время разряда конденсатора; $\tau_{\text{э}} = \sqrt{LC_{\text{э}}}$; $\rho_{\text{э}} = \sqrt{L/C_{\text{э}}}$; t_{cnk} – время спада тока; i_{Lk} – ток в дросселе [161,195].

При необходимости повышения частоты ходов машины с ЛЭМД следует использовать электрический преобразователь с секционированным емкостным накопителем энергии (рис.4.8) [195].

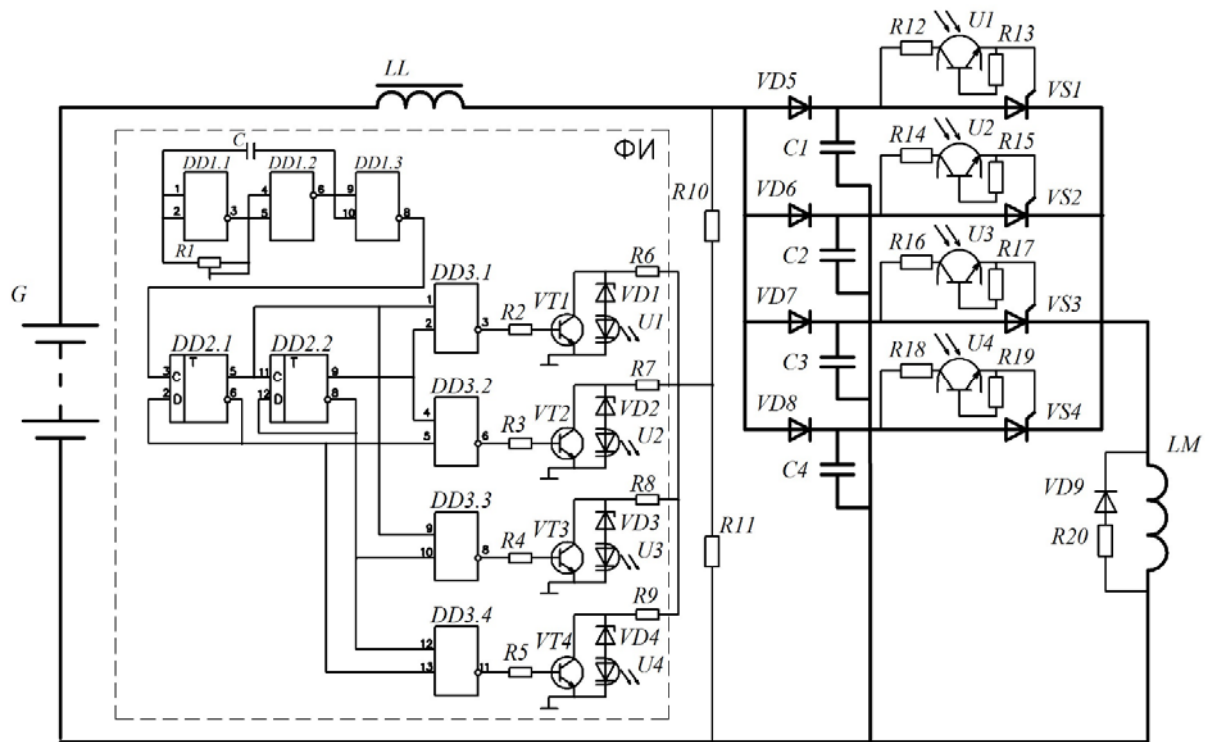


Рис.4.8 – Электрическая схема преобразователя с секционированным емкостным накопителем энергии.

Силовая часть электрического преобразователя включает в себя четыре группы конденсаторных накопителей энергии $C1 - C4$, заряжаемые от источника постоянного тока – аккумуляторной батареи G , силовые тиристоры $VS1 - VS4$ и обмотку LM двигателя.

Для реализации режима последовательных срабатываний с заданной частотой схема содержит формирователь импульсов $\Phi И$, включающий генератор импульсов логического уровня на элементах $DD1.1 - DD1.3$, счетный D -триггер $DD2.1 - DD2.2$, логические элементы микросхемы $DD3$, транзисторы $VT1 - VT4$ со светодиодами транзисторных оптронов $U1 - U4$, включенных параллельно коллекторно-эмиттерным переходам, фототранзисторы оптронов $U1 - U4$ в цепях управляющих электродов тиристоров $VS1 - VS4$.

Подстроечным резистором $R1$ плавно изменяется частота следования управляющих импульсов генератора в пределах 1–20 Гц. Диоды $VD5 - VD8$

препятствуют перетеканию заряда с одной конденсаторной батареи в другую при закрытых тиристорах и разряду всех групп накопителей на обмотку LM при отпирании любого из тиристорov. Для уменьшения бросков тока при отпирании тиристорov служит дроссель LL [195].

Триггеры микросхемы $DD2$, соединенные между собой последовательно образуют двоичный счетчик импульсов, поступающих на его вход от генератора. В итоге на выходе первого триггера частота импульсов уменьшается вдвое, а на выходе второго – вчетверо. Элементы микросхемы $DD3$, работающие как дешифраторы логических состояний триггеров счетчика, формируют сигналы, включающие в заданном порядке транзисторные оптроны $U1 - U4$.

Формирователь импульсов ФИ подключается к источнику питания через делитель напряжения на резисторах $R10$ и $R11$. После предварительного заряда всех конденсаторных батарей $C1 - C4$, на выходе элементов $DD3.1 - DD3.3$ появляется уровень логической единицы, а на выходе элемента $DD3.4$ устанавливается логический ноль. При этом отпираются транзисторы $VT1 - VT3$, а транзистор $VT4$ остается заперт, что вызывает свечение светодиода транзисторной оптопары $U4$ и срабатывание фототранзистора $U4$, включенного в цепь управляющего электрода тиристора $VS4$. При протекании управляющего тока тиристор отпирается, и конденсаторная батарея $C4$ разряжается на обмотку LM , обеспечивая срабатывание ЛЭМД.

При следующем переключении генератора импульсов, логический ноль устанавливается на выходе элемента $DD3.1$, закрывается транзистор $VT1$, включается оптрон $U1$, отпирается тиристор $VS1$, который вызывает разряд батареи $C1$ и очередное срабатывание ЛЭМД, а разрядившийся накопитель $C4$ начинает заряжаться [83,195].

Аналогично, при третьем импульсе генератора разряжается конденсаторная группа $C2$, при четвертом – $C3$. Далее описанный цикл работы схемы повторяется.

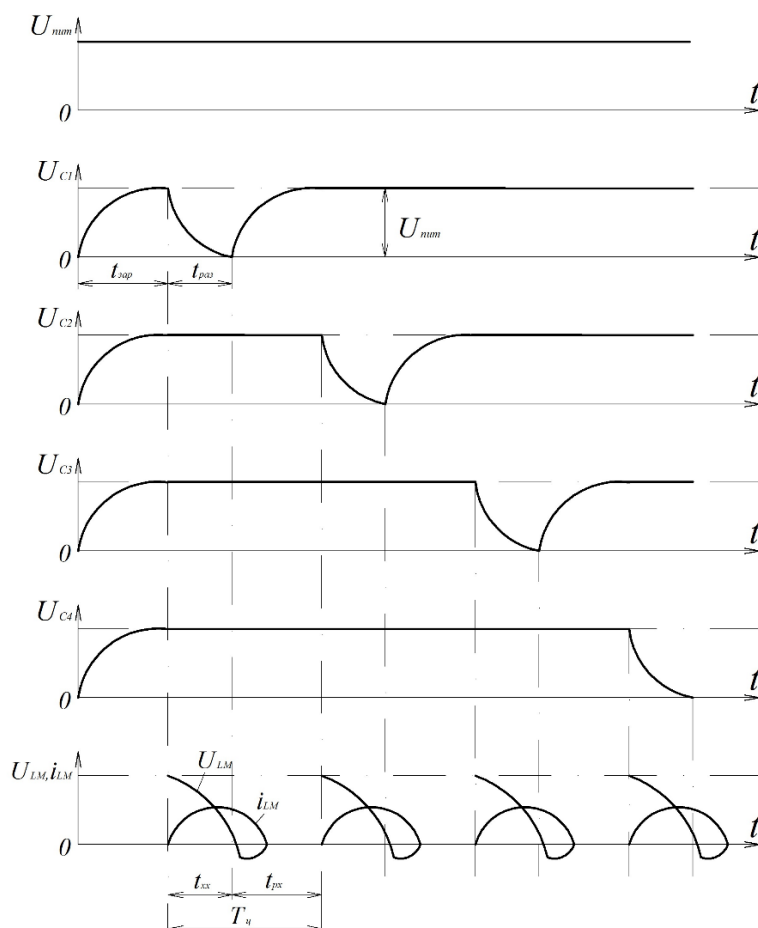


Рис.4.9 – Временные диаграммы процессов электрического преобразователя с секционированным емкостным накопителем энергии

Частота переключений генератора импульсов подбирается в соответствии с временем одного цикла ЛЭМД:

$$f=1/T_u, \quad (4.18)$$

где $T_u = t_{cp} + t_{воз}$.

Как видно из временной диаграммы процессов в преобразователе, представленной на рис.4.9, любая разряженная конденсаторная батарея к моменту следующего срабатывания полностью заряжается.

Достоинствами данного электрического преобразователя являются:

- управление выходной энергией подбором емкости конденсаторной батареи и уровня ее заряда;
- отсутствие специальных зарядных устройств конденсаторных батарей из-за уменьшенных емкостей секций;
- незначительные потери энергии;

- естественное запираание тиристоров, приводящее к уменьшению эффекта «залипания» якоря ЛЭМД;
- необходимые частоты срабатывания ЛЭМД;
- приемлемая работоспособность при выходе из строя одной из группы конденсаторов.

Энергопреобразование в ЛЭМД с питанием от электрического преобразователя с промежуточным емкостным накопителем энергии рассмотрено в главе 5.

4.2 Электрические преобразователи с автоматическим управлением выходных параметров машин с ЛЭМД

4.2.1 Адаптивная система автоматического регулирования выходной механической энергии машины с ЛЭМД

Необходимость совершенствования электромеханических систем с линейными электромагнитными двигателями и аккумуляторным питанием для реализации, например, ударных операций при погружении стержневых элементов в грунт [195,228], предполагает эффективное использование энергозапаса аккумуляторов и увеличение продолжительности работы системы без подзарядки источника. При этом важным является оценка целесообразности и определение возможности реализации системы, обеспечивающей автоматическую коррекцию потребляемой от аккумуляторов электроэнергии при изменении свойств нагрузки – грунта. Как показано в [195,196], предпочтительными для технического воплощения здесь представляются электромеханические системы с ЛЭМД, оснащенными датчиками предельных положений якоря и управляемыми по координате его положения.

Величина $A_{y\partial}=0,5m_{\partial}v_{y\partial}^2$, определяемая линейной скоростью $v_{y\partial}$ якоря-бойка в момент удара по стержню, должна обеспечивать последовательные заглубления ΔY и уверенное погружение стержня на заданную глубину Y и зависит от массогабаритных характеристик стержня и свойств грунта [195,196]:

$$A_{y\partial} = \frac{S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y}{\eta - \frac{\rho \cdot \sin \alpha \cdot S \cdot \Delta Y}{m_c + m_\partial}}, \quad (4.19)$$

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

Значение m_c учитывает еще часть массы сцепленного со стержнем грунта при упругопластической модели взаимодействия в системе «стержень – грунт» [196].

Из (4.19) следует, что потребное значение A_y не остается неизменным даже при однократной забивке, так как по мере заглубления возрастает величина m_c ; коэффициенты C_x, C_y от слоя к слою при неоднородном, с включениями, грунте также меняются, например, резко возрастают при встрече полуглубленного стержня с твердым включением (препятствием). Забивание в пределах некоторой площади совокупности стержней, к геометрии и свойствам поверхности которых нет строгих требований, расширяет диапазон значений $A_{y\partial.min} \dots A_{y\partial.max}$ потребной механической энергии. На практике, обычно, величину $A_{y\partial}$ выбирают без учета заглубления стержня в грунт с обобщенными среднестатистическими свойствами так, чтобы обеспечить в УМ верхний предел диапазона $A_{y\partial}$ и ударную мощность $P_{y\partial}$ для гарантированного погружения:

$$A_{y\partial} = \eta W_{эл} = \eta \int_0^{t_y} p(t) dt = \eta \int_0^{t_y} u(t) i(t) dt, \quad (4.20)$$

$$A_{y\partial} = P_{y\partial} / n = P_{y\partial} t_y, \quad (4.21)$$

где η – КПД ЛЭМД; p, u, i – мгновенные мощность, напряжение, ток соответственно обмотки ЛЭМД; $t_y = t_{px} + t_{xx}$ продолжительность рабочего цикла ЛЭМД;

t_{px} – продолжительность рабочего хода (срабатывания) якоря; t_{xx} – продолжительность возврата (холостого хода) якоря пружиной; $P_{y\partial}$ – ударная мощность ЛЭМД; $n = 1/t_y$ частота срабатываний (частота ходов) якоря ЛЭМД, определяемая свойствами автоколебательной системы «якорь – возвратная пружина».

Однако избыток электрической и механической энергии на начальном этапе забивки приводит к перегреву обмотки, сокращает механический ресурс подвижных частей ЛЭМД, а при использовании аккумуляторов в качестве источника питания, – уменьшает их разрядную емкость и число забиваемых без подзарядки стержней [196].

Таким образом, согласование с условиями забивки мощности питающего импульса, определяющей $A_{y\partial}$ ударной машины с ЛЭМД, которая по мере заглубления или при встрече забиваемого стержня с твердыми включениями в грунте автоматически увеличивается, представляется важным.

Согласно (4.20) варьирование $W_{эл}$ и $A_{y\partial}$ может достигаться воздействием на продолжительность энергопотребления (рабочего цикла t_y), либо на величину поступающей в обмотку ЛЭМД мощности p изменением подаваемого напряжения u при заданных свойствах обмотки. В большинстве известных электромеханических систем с ЛЭМД [131,149], питаемых от источников переменного тока, регулирование выходной энергии УМ обеспечивается электрическими преобразователями ЭП изменением длительности питающего импульса напряжения, которая выполняется ручной настройкой параметров времязадающей RC-цепи [149]. Уровень напряжения питающего импульса не регулируется и ограничен значениями линейного или фазного напряжения питающей сети. Для систем с аккумуляторными источниками длительность питающего импульса определяется либо настройками вручную задающего генератора импульсов в ЭП, либо датчиками предельных положений якоря ЛЭМД, обеспечивающими коммутацию обмотки с источником, обратную связь и управление УМ по координате якоря [195,196]. При необходимости, амплитуда напряжения, мощность питающих импульсов и выходная энергия $A_{y\partial}$ ЛЭМД здесь могут меняться в значительных пределах варьированием числа k

последовательно включенных в АИП аккумуляторных батарей. Коммутация производится вручную перед включением системы в работу; в процессе забивки стержня k остается неизменным.

Однако именно системы, где реализовано управление ЛЭМД по координате движущегося якоря [195,196,228], позволяют выполнить и автоматическую коррекцию $A_{y\partial}$ УМ соответственно изменяющимся условиям забивки. В таких системах датчики предельных положений якоря-бойка обеспечивают не только коммутацию тока в обмотке ЛЭМД, но и позволяют легко получить информацию об изменении условий погружения (возрастании плотности грунта, встрече с препятствиями и т.д.) и сформировать управляющие сигналы для увеличения энергии удара $A_{y\partial}$ ЛЭМД УМ при забивке стержня [4].

Значение возникающего при соударении якоря и стержня ударного импульса зависит от их масс m_b , m_c , упругих свойств и скоростей $v_{y\partial}$, v_{ny} до и после удара [160]. Полагая удар якоря по стержню прямым, центральным, с учетом принятых в теории удара допущений, рассмотрим модель абсолютно неупругого удара якоря по абсолютно неподвижному стержню при $m_b > m_c$, определяющую начальную стадию забивки незаглубленного стержня или его забивку в дисперсные несвязные грунты, и модель, близкого к абсолютно упругому, соударения бойка и стержня, определяющую забивку в дисперсные крупнообломочные или мерзлые грунты [196].

Результаты соударения в системе «якорь–стержень» для выбранных моделей оценим коэффициентом восстановления, определяемым соотношением $k = v_{ny}/v_{y\partial}$ [8,160]. Для первой модели, при абсолютно неупругом ударе, $k \approx 0$; для второй – значение k варьируется в диапазоне $0 < k < 1$. В частности, согласно [160] при скоростях соударения до 10 м/с стали о сталь значение $k = 0,5 - 0,6$.

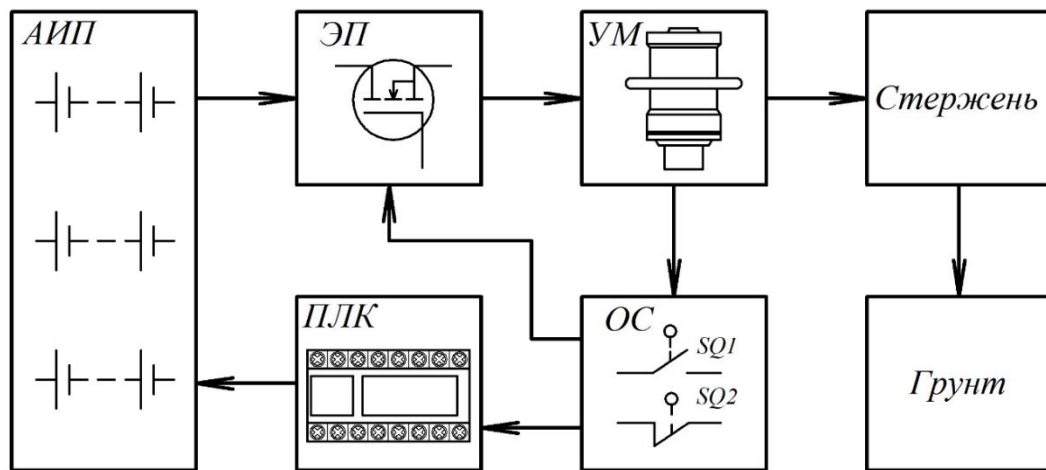


Рис.4.10 – Структурная схема управляющей системы с автоматической подстройкой выходной механической энергии при изменении свойств нагрузки: АИП – аккумуляторный источник питания; ЭП – электрический преобразователь; УМ – ударная машина; ПЛК – программируемый логический контроллер; ОС – обратная связь.

Очевидно, что в первом случае после удара по стержню якорь начинает возврат (холостой ход) под действием упругих сил пружины при нулевой начальной скорости $v_{ny} \approx 0$, во втором случае возвращаемый пружиной якорь обладает начальной скоростью, которая может достигать $v_{ny} \approx 0,5 \cdot v_y$ и повышать среднюю скорость v_{cp} якоря на интервале t_{xx} холостого хода. При этом, в соответствии с (4.21), сокращаются временные интервалы $t_{xx} = \delta/v_{cp}$ и t_u , возрастает частота ходов $n = l/t_u$ и частота переключений датчиков предельных положений якоря ЛЭМД. Именно устойчивое изменение (увеличение) частоты переключений датчиков предельных положений якоря (рис.4.10) удобно использовать в качестве сигнала обратной связи для реализации режима автоматической коррекции механической энергии ЛЭМД УМ в процессе погружения стержня.

Структурная схема предлагаемой системы, обеспечивающей автокоррекцию механической энергии A_{y0} ЛЭМД УМ в процессе забивания стержня в грунт, представлена на рис.4.10.

Для питания УМ используется автономный аккумуляторный источник АИП с электрическим преобразователем ЭП, осуществляющим управление ЛЭМД УМ в функции координаты якоря с помощью датчиков ОС предельных положений $SQ1$, $SQ2$ [195,196].

Коррекция величины $A_{уд}$ УМ обеспечивается ступенчатым варьированием выходного напряжения АИП изменением числа последовательно включаемых аккумуляторных батарей в источнике непосредственно в процессе забивания стержня (рис.4.11). Рассмотрен пример АИП с тремя батареями $G1$, $G2$, $G3$ [4,81].

Изменение условий погружения в процессе забивки (увеличение плотности грунта, встреча стержня с включениями и т.п.) повышает частоту ходов n якоря ЛЭМД, увеличивает частоту импульсов сигнала ОС и обеспечивает подключение к исходному набору батарей дополнительной аккумуляторной батареи. Если по мере дальнейшего заглубления происходит последующее возрастание n подключается очередная (последующие) аккумуляторная батарея [4,81].

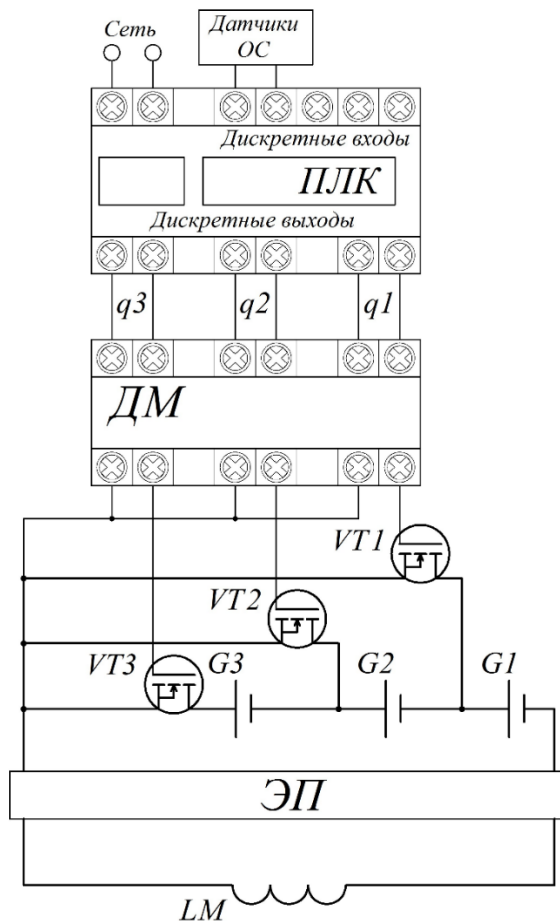


Рис.4.11 – Электрическая схема коммутации батарей аккумуляторного источника питания: ДМ – драйверная микросхема; $q1...q3$ – дискретные выходы ПЛК; $G1...G3$ – аккумуляторные батареи; LM – обмотка ЛЭМД; $VT1...VT3$ – полевые транзисторы *MOSFET*.

Упрощенная принципиальная электрическая схема коммутации батарей в источнике АИП с учетом изменяющихся в процессе забивки стержня условий

показана на рис.4.11. Сигнал обратной связи, сформированный $SQ1$, $SQ2$, подается в микропроцессорное устройство – программируемый логический контроллер ПЛК, управляющий силовыми транзисторами $VT1 \dots VT3$, которые переключают зажимы батарей и изменяют выходное напряжение источника и обмотки ЛЭМД УМ непосредственно в процессе забивки. При этом ПЛК обеспечивает алгоритм коммутации: если $n < n_1 - U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{LOW}} = U_{G1}$; если $n_2 > n > n_1 - U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{LOW}} = U_{G1} + U_{G2}$; если $n > n_2 - U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{HIGH}} = U_{G1} + U_{G2} + U_{G3}$, где n_1 , n_2 – частота ходов якоря-бойка, задаваемая эмпирически; $U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{LOW}}$, $U_{\text{ЛЭМД}}$, $U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{HIGH}}$ – напряжение на зажимах АИП при подключении аккумуляторных батарей $G1$, $G2$, $G3$ соответственно; U_{G1} , U_{G2} , U_{G3} – напряжение первой, второй и третьей аккумуляторных батарей (рис.4.12).

Программирование ПЛК осуществляется в среде *CoDeSyS* с помощью языка *CFC* и стандартной библиотеки функциональных блоков (Приложение 2), совокупность и схема соединения которых представлены на рис.4.12 [4,141,145].

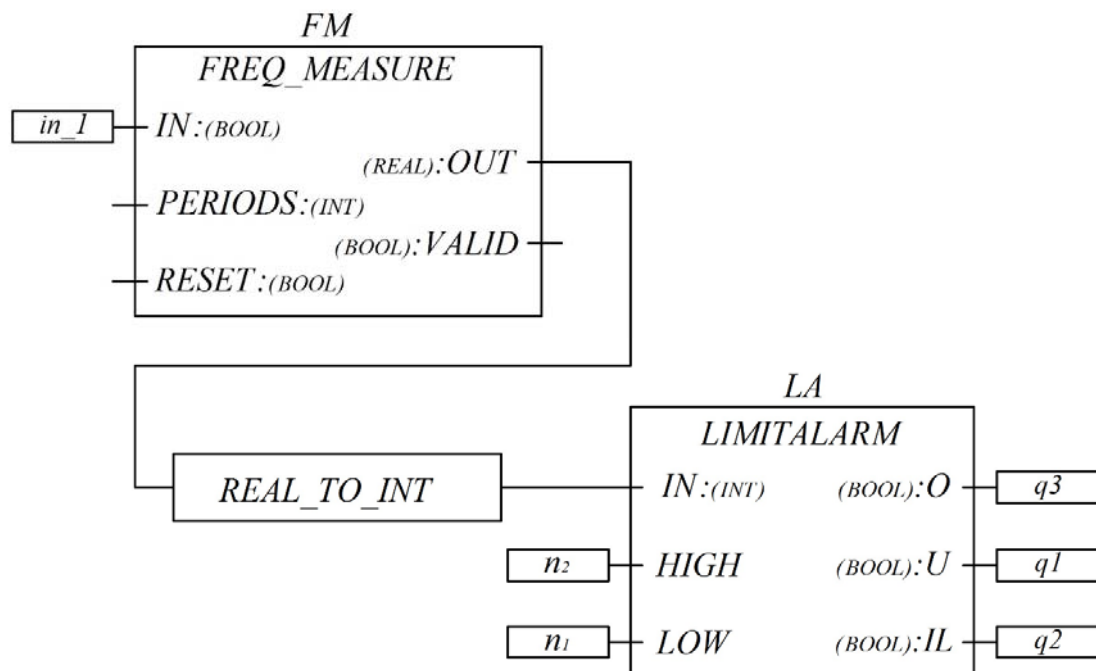


Рис.4.12 – Схема соединения функциональных блоков

На дискретный вход in_1 контроллера подаются импульсы сигнала обратной связи от датчиков положения якоря ЛЭМД УМ. Функциональный блок

FREQ_MEASURE позволяет измерять усредненную частоту входного сигнала типа *BOOL*. Вход *PERIODS* используется для задания периодов для усреднения. Для сброса измеренной частоты сигналов используется вход *RESET*.

На выходе *OUT* (тип данных *REAL*) блока *FREQ_MEASURE* устанавливается усредненная частота сигналов, которая через преобразователь типов *REAL_TO_INT* поступает на вход *IN* функционального блока *LIMITALARM*, контролирующего принадлежность значения входа *IN* заданному диапазону. Входы *LOW* и *HIGH* определяют границу диапазона [4,145].

Если значение на входе *IN* меньше предела *LOW* (при $n < n_1$) на выходе *U* (тип данных *BOOL*) устанавливается *TRUE* (логическая единица). Активизируется выход *q1* ПЛК и через устройство согласования логических сигналов контроллера с сигналами управления силовыми ключами формируется воздействие, отпирающее транзистор *VT1*. Питание ЛЭМД ударной машины осуществляется от аккумуляторной батареи *G1* (рис.4.12): $U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{LOW}} = U_{G1}$.

Когда на входе *IN* обеспечивается значение в интервале *LOW* и *HIGH* ($n_2 > n > n_1$) на выходе *IL* блока *LIMITALARM* устанавливается *TRUE*, при этом на выходе *O* и выходе *U* – *FALSE* (логический ноль). Активизируется выход *q2* ПЛК и питание ЛЭМД ударной машины осуществляется от *G1* и *G2*: $U_{\text{ЛЭМД}} = U_{G1} + U_{G2}$.

Если значение на входе *IN* превышает предел *HIGH* ($n > n_2$) на выходе *O* = *TRUE*, *U* – *FALSE* и *IL* – *FALSE*. Активизируется выход *q3*, *VT1* и *VT2* закрываются, а транзистор *VT3* переходит в проводящее состояние. Электромагнитная ударная машина переключается на максимальное напряжение $U_{\text{ЛЭМД}}^{\text{HIGH}} = U_{G1} + U_{G2} + U_{G3}$ [4,81].

В качестве иллюстрации на рис.4.13 представлена идеализированная качественная диаграмма изменения механической мощности ЛЭМД УМ на интервале t_3 погружения стержня при реализации или отсутствии адаптивной подстройки. Если полагать, что при начальном напряжении источника U_{G1} обеспечивается половинное значение механической мощности, отдаваемой ЛЭМД УМ

при максимальном значении $U_{G1}+U_{G2}+U_{G3}$, и существует линейная корреляция «напряжение источника – механическая мощность ЛЭМД УМ», то в ЛЭМД-приводе с автоподстройкой при последовательном равномерном увеличении напряжения источника на интервале t_3 можно рассчитывать на уменьшение отбираемой от источника на погружение стержня энергии на четверть [4].

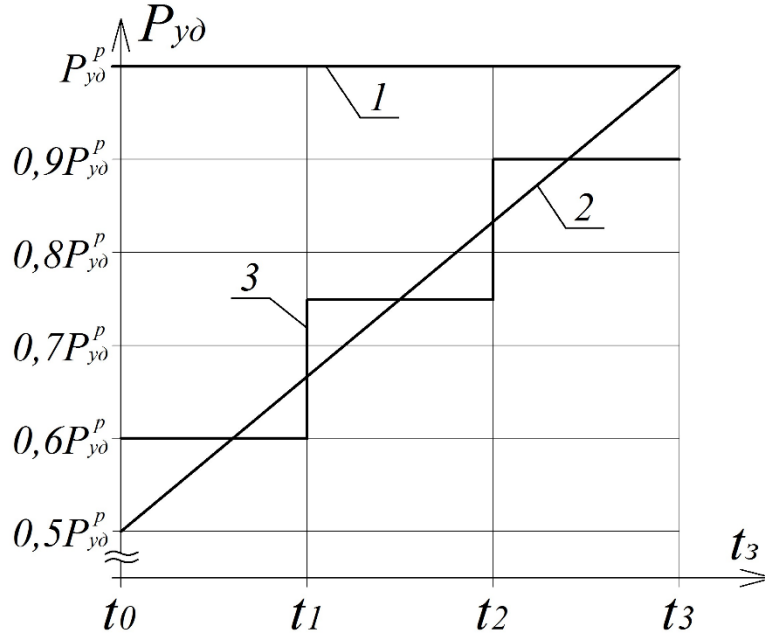


Рис.4.13 – Изменение ударной мощности $P_{y\partial}$ ЛЭМД УМ на интервале погружения стержня:
 1 – характеристика $P_{y\partial}=f(t_3)$ в отсутствие коррекции;
 2 – идеальная характеристика $P_{y\partial}=f(t_3)$; с бесконечным числом коммутаторов;
 3 – фактическая характеристика $P_{y\partial}=f(t_3)$ системы с автокоррекцией

Используя модель ЛЭМД с осевым каналом (рис.2.7) проведем сравнительную оценку выходных показателей электромагнитной ударной машины с адаптацией выходной энергии.

Моделирование процесса регулирования выходной механической энергии удара $A_{y\partial}$ в зависимости от свойств нагрузки (грунта) будем осуществлять исходя из выражения (4.21) и предположения о том, что с увеличением плотности грунта повышается коэффициент восстановления k и уменьшается время t_u цикла ударной машины. Таким образом, напряжение питания, подаваемое на обмотку ЛЭМД будет определяться значением t_u :

$$U_{num} = \begin{cases} U_{G1} & \text{при } t_1 < t_u; \\ U_{G1} + U_{G2} & \text{при } t_2 < t_u < t_1; \\ U_{G1} + U_{G2} + U_{G3} & \text{при } t_u < t_2, \end{cases} \quad (4.22)$$

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

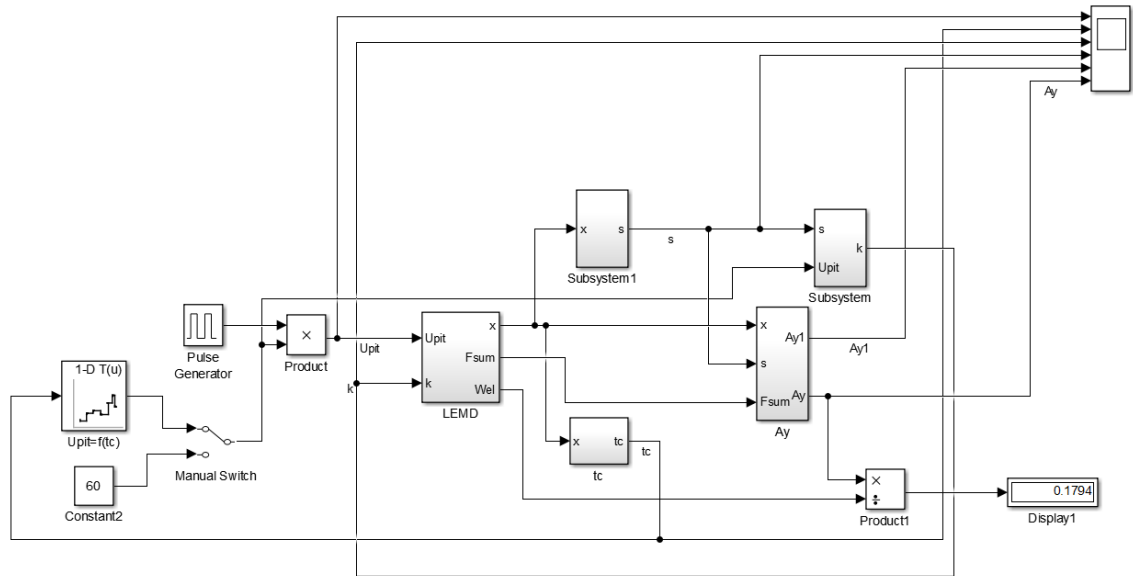


Рис.4.14 – Структурная схема моделирования рабочих процессов ЛЭМД ударной машины с адаптивной САР

На рис.4.14 представлена структурная схема моделирования рабочих процессов ЛЭМД ударной машины с адаптивной подстройкой выходной энергии, которая, учитывая конструктивные особенности двигателя (в частности, массу якоря, величину осевого канала, жесткость возвратного элемента, параметры обмотки и др.) и режимные параметры системы питания и управления (например, уровни и величину импульса напряжения и др.), производит расчет и построение следующих зависимостей [40,58,260]:

- величины заглубления l стержневого элемента от времени;
- коэффициента восстановления k от величины заглубления l стержневого элемента (при этом считаем грунт идеальным, то есть однородным без механических включений);
- времени цикла t_u (на рис.4.14 обозначено t_c) от коэффициента восстановления k ;
- уровня напряжения U_{num} питания (на рис.4.14 обозначено U_{pit}) обмотки ЛЭМД от времени цикла t_u ;
- энергии удара $A_{уд}$ от уровня напряжения U_{num} питания обмотки;
- суммарной механической работы $A_{мех}$ от времени работы машины с ЛЭМД.

Алгоритм расчета (рис.4.14) динамических характеристик ЛЭМД ударной машины представляется следующим образом [39,42,260,263]. Блок «*Product*» с помощью генератора прямоугольных импульсов «*Pulse Generator*» формирует соответствующий уровень напряжения на блоке «*LEMD*», описывающем рабочий процесс двигателя по структурной схеме рис.2.7. Питание двигателя может осуществляться как от одного максимального уровня напряжения (блок «*Constant2*»), так и от нескольких уровней с помощью блока « $U_{pit}=f(t_c)$ » по сигналу обратной связи блока « t_c » (рис.4.15), вычисляющего время цикла $t_{\text{ц}}$. Выбор режима работы осуществляется переключателем «*Manual Switch*» [58,260].

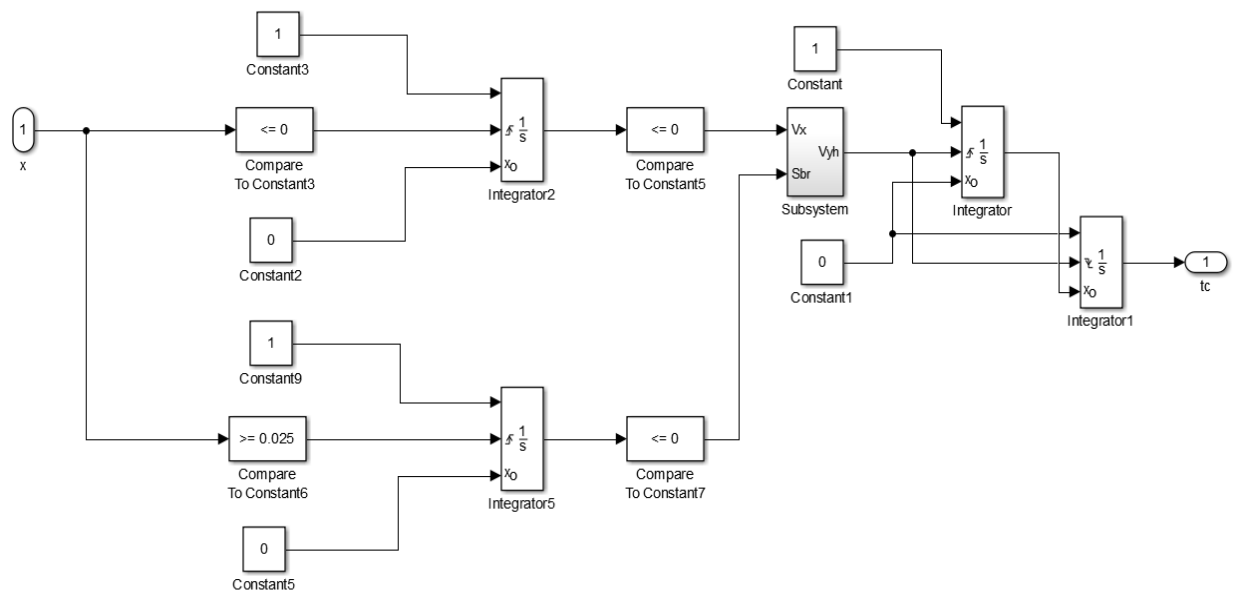


Рис.4.15 – Структурная схема блока « t_c » для расчета времени отскока якоря

Расчет коэффициента восстановления k и величины заглубления стержня от времени осуществляется соответственно в блоке «*Subsystem*» и в блоке «*Subsystem 1*», структурные схемы которых показаны на рис.4.16 и 4.17.

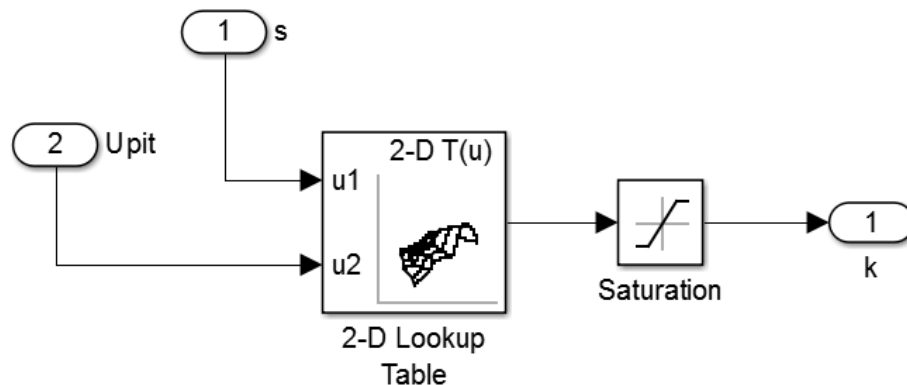


Рис.4.16 – Структурная схема блока "Subsystem" для расчета зависимости $k = f(t)/$

Блок «Subsystem 1» (рис.4.17) производит расчет величины l путем интегрирования приращений dl погружения стержня за один рабочий ход якоря:

$$l = \int_0^{t_k} \frac{dl}{dt} dt \Big|_{\frac{dl}{dt} > 0}, \quad (4.23)$$

где t_k – время погружения одного стержня длиной l .

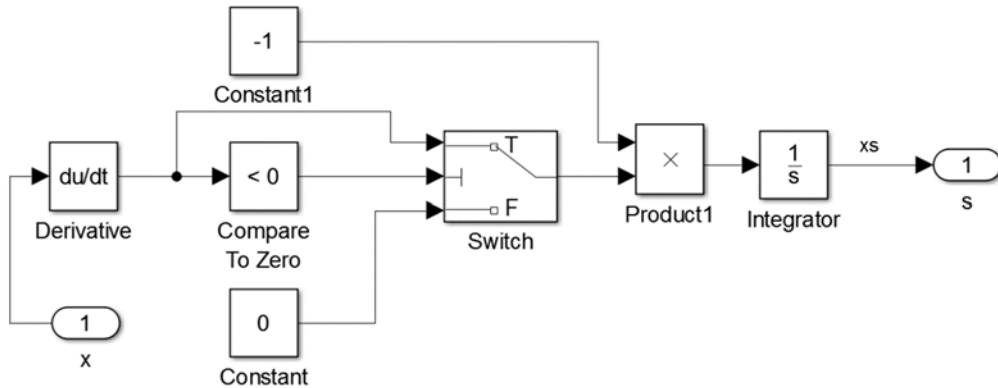


Рис.4.17 – Структурная схема блока "Subsystem 1" для расчета зависимости $l = f(t)$.

Для расчета энергии $A_{y\delta}$ удара единичного срабатывания ЛЭМД ударной машины используется блок « A_y », структура которого показана на рис.4.18.

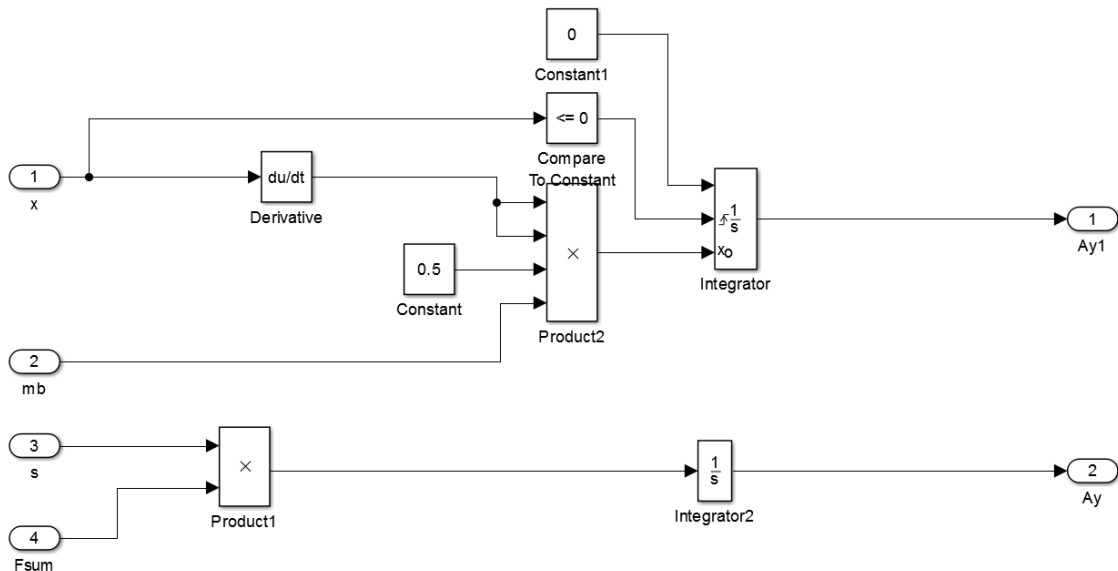


Рис.4.18 – Структурная схема блока « $A_{y\delta}$ » для расчета энергии удара ЛЭМД

Расчет значения $A_{y\delta}$ осуществляется в соответствии с выражением:

$$A_{y\delta} = \frac{1}{2} m_{\text{я}} v_{y\delta}^2 \Big|_{\delta=0}, \quad (4.24)$$

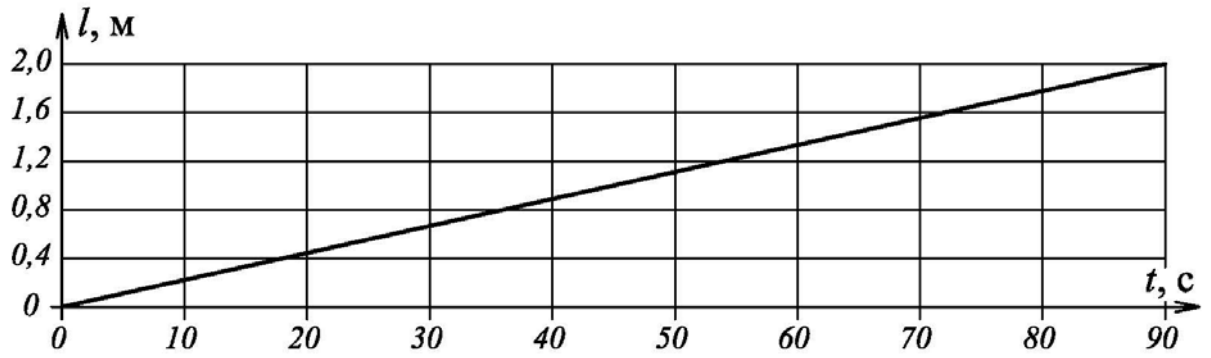
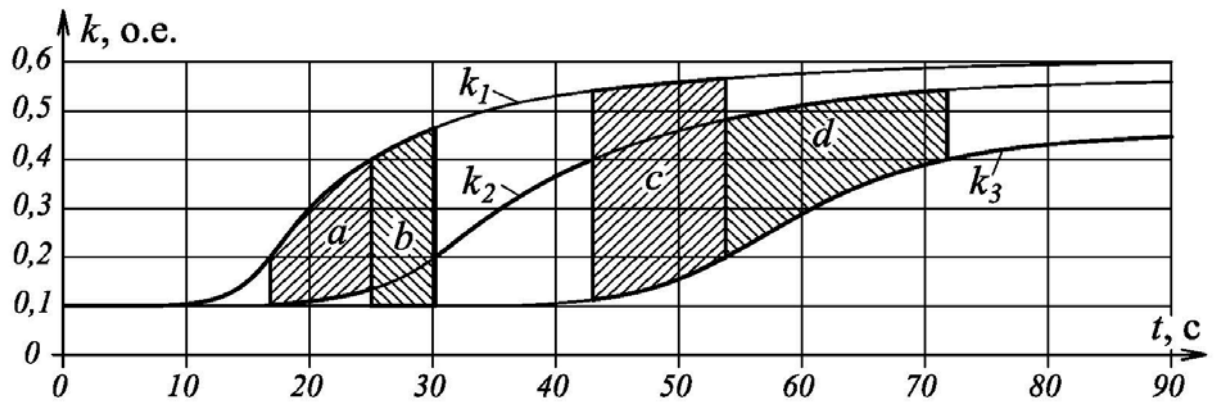
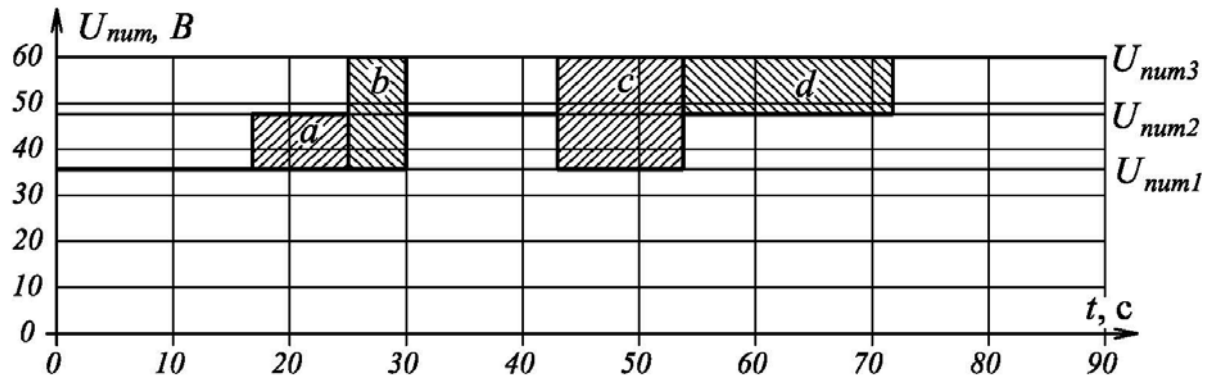
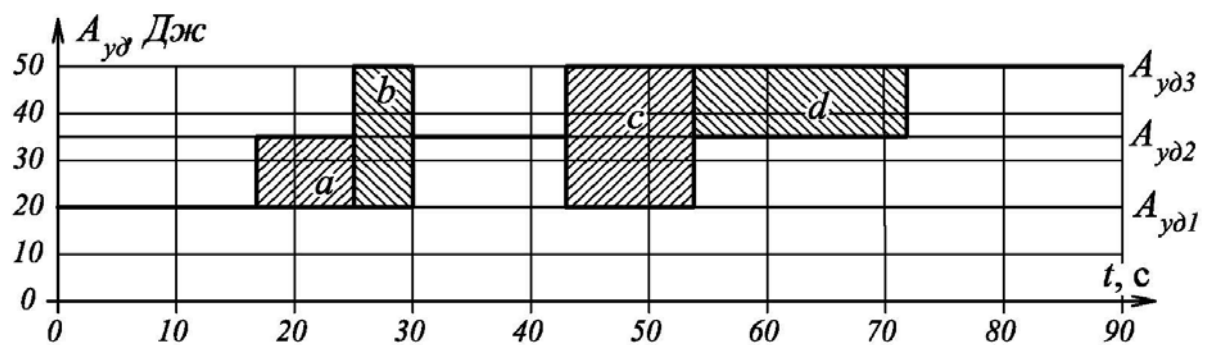
где $m_{\text{я}}$ – масса якоря ЛЭМД, $v_{y\partial}$ – предупредная скорость якоря при $\delta=0$; δ – рабочий воздушный зазор.

Результаты моделирования рабочего процесса ЛЭМД-привода с адаптивной подстройкой представлены соответствующими зависимостями на рис.4.19 – рис.4.22. Расчеты проводились при следующих допущениях:

- грунт считается однородным без дополнительных механических включений. Его плотность соответствует плотности немёрзлого и нескального грунта, например, чернозема;
- длина l погружаемого стержневого элемента составляет $l=2$ м, время t погружения которого выбрано $t=90$ с;
- коэффициент k восстановления скорости якоря зависит от глубины погружения стержневого элемента и соответствует приведенным на рис.4.20 характеристикам при различных значениях напряжения питания U_{num} :

$$k = \begin{cases} k_1 & \text{при } U_{\text{num}1} = U_{G1}; \\ k_2 & \text{при } U_{\text{num}2} = U_{G1} + U_{G2}; \\ k_3 & \text{при } U_{\text{num}3} = U_{G1} + U_{G2} + U_{G3}, \end{cases} \quad (4.25)$$

В начальный момент времени (при $t=0\dots17$ с) погружение стержневого элемента в грунт осуществляется с энергией удара $A_{y\partial1}$ (рис.4.22), соответствующей минимальному значению напряжении питания $U_{\text{num}1}=U_{G1}$ (рис.4.21). При этом коэффициент k восстановления составляет не более $k_1 \leq 0,2$ (рис.4.20). По мере заглубления стержня величина k_1 растет и при достижении значения $k_1 > 0,2$ происходит переключение обмотки двигателя на напряжение $U_{\text{num}2}=U_{G1}+U_{G2}$ (рис.4.21). Энергия удара увеличивается до значения $A_{y\partial2}$ (рис.4.22), а коэффициент восстановления k_2 становится равным $k_1 \leq 0,2$, что приводит к возвращению питания $U_{\text{num}1}=U_{G1}$ (рис.4.20-рис.4.22, подобласть «а»). Когда $k_1 > 0,4$ (рис.4.20, подобласть «b») или $k_2 > 0,4$ (рис.4.20, подобласть «с») переключения происходят между режимами питания – $U_{\text{num}1}=U_{G1}$ и $U_{\text{num}3}=U_{G1}+U_{G2}+U_{G3}$ (рис.4.21, подобласть «b» и «с»), энергией $A_{y\partial}$ удара – $A_{y\partial1}$ и $A_{y\partial3}$ (рис.4.22, подобласть «b» и «с»). При этом значение $k_3 \leq 0,2$.

Рис.4.19 – Зависимость величины l заглубления стержневого элемента от времени $l=f(t)$ Рис.4.20 – Изменение коэффициента k восстановления во времени $k=f(t)$ Рис.4.21 – Изменение напряжения питания U_{num} во времени $U_{num}=f(t)$ Рис.4.22 – Изменение энергии удара $A_{y\partial}$ во времени $A_{y\partial}=f(t)$

В момент времени, когда коэффициент k_3 становится $k_3 > 0,2$ ($t > 54$ с, рис.4.20, подобласть «d») происходит переключение напряжения U_{num} питания между $U_{num2} = U_{G1} + U_{G2}$ и $U_{num3} = U_{G1} + U_{G2} + U_{G3}$ (рис.4.21, подобласть «d»); энергии $A_{y\partial}$ удара между $A_{y\partial2}$ и $A_{y\partial3}$ (рис.4.22, подобласть «d»).

Для исключения постоянных переключений между режимами при программировании (рис.4.12) задается время для повторного опроса датчиков обратной связи (рис.4.11). Чем больше период опроса, тем реже будут происходить переключения между источниками питания. Однако точность регулирования энергии $A_{y\partial}$ удара будет снижаться, что приводит к увеличению энергопотребления и ухудшению выходных показателей всего ЛЭМД-привода. Таким образом, изменением ширины подобластей «a», «b», «c» и «d» (рис.4.20) подбирается предпочтительный режим для погружения стержней на заданную глубину в грунт переменной плотности.

Предварительная оценка механической работы $A_{мех}$, затрачиваемой на погружение одного стержня длиной $l=2$ м ЛЭМД-приводом с адаптивной автоподстройкой и без нее, свидетельствует о том, что применение автоматической подстройки выходной энергии удара в зависимости от свойств грунта снижает избыточность энергии $A_{мех}$ в среднем на 20...28 % и является перспективной при питании ударной машины от автономных источников ограниченной мощности [4,81].

4.2.2 Автоматическое управление выходной механической энергией в функции времени

Удельные выходные показатели ЛЭМД-приводов ударного типа определяются эффективностью энергопреобразовательных процессов в линейных электромагнитных двигателях [131,149,195,196]. При этом применение конденсаторных источников [195] позволяет легко реализовать в двигателе циклы с различной интенсивностью превращения магнитной энергии в механическую и представляется эффективным средством улучшения выходных характеристик машин, например, электромагнитных сводообрушителей с ЛЭМД.

Характерным показателем ударного ЛЭМД-привода выступает значение механической энергии A_y , обеспечивающее разрушение сводов в бункере. Однако избыток A_y оказывает негативное разрушительное влияние на стенки бункера и ударник ЛЭМД, а избыток электрической $W_{эл}$ приводит к перегреву обмотки. Таким образом, важной является разработка системы автоматического управления (САУ) энергией удара сводообрушителя с ЛЭМД от электрического преобразователя с секционированным емкостным накопителем энергии, функциональная схема которой представлена на рис.4.23. Питание электромагнитного сводообрушителя 5 (ЭМС) осуществляется от секционированного емкостного накопителя 9 (СЕН) через блок коммутационных элементов 8 (КЭ1-КЭ3), например, транзисторов MOSFET [153].

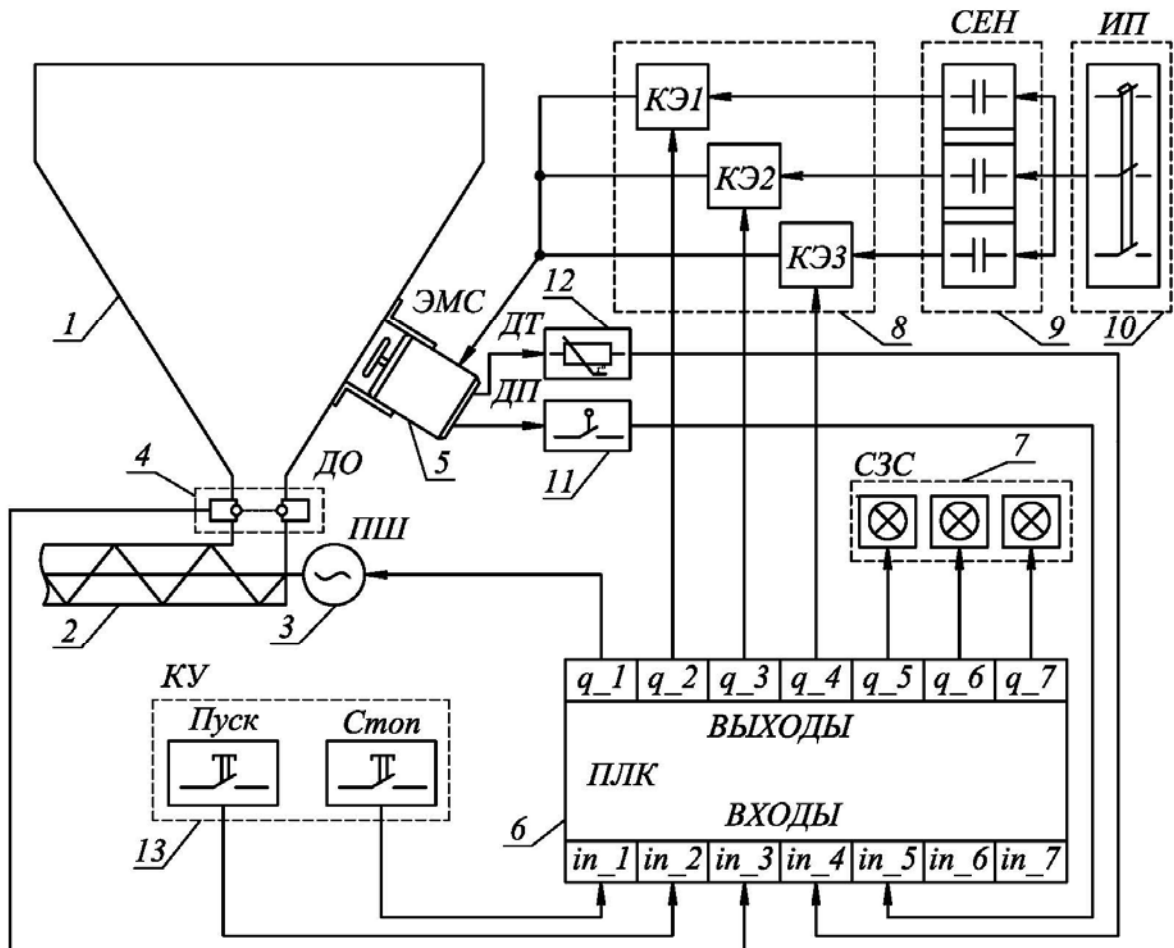


Рис.4.23 – Функциональная схема САУ энергией удара сводообрушителя: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – привод шнека; 4 – оптический датчик; 5 – электромагнитный сводообрушитель; 6 – программируемый логический контроллер; 7 – светозвуковая сигнализация; 8 – коммутационные элементы; 9 – секционированный емкостный накопитель; 10 – источник питания; 11 – датчик положения; 12 – датчик температуры; 13 – кнопки управления.

Запуск шнека 2 осуществляется кнопкой управления 13 (КУ). Для контроля истечения муки из бункера используется оптический датчик 4 (ДО), работающий по принципу приема прямого луча от излучателя (Т-типа) [70,234].

При возникновении свода в бункере 1 сигнал от датчика ДО подается в программируемый логический контроллер 6 (ПЛК), на выходе которого формируется сигнал управления коммутационным элементом КЭ1. Одна из секций накопителя 9 напряжением $0,6U_m$, где U_m – максимальное напряжение заряда, подключается к обмотке двигателя 5, который производит три удара с энергией $A_{уд}$ по стенке бункера 1. Если истечение муки не возобновилось контроллер 6 подает сигнал управления на КЭ2 и к обмотке ЭМС подключается дополнительная секция емкостного накопителя, напряжение увеличивается до $0,8U_m$, энергия удара повышается до $A_{y\partial 2} > A_{y\partial 1}$ [77].

Условием подключения сводообрушителя на максимальное напряжение U_m является продолжающийся режим отсутствия течения муки. При этом воздействие ударника на стенку бункера происходит с максимальной энергией $A_{y\partial.max} > A_{y\partial 2}$.

Если свод не разрушился, контроллер подает сигнал на отключение сводообрушителя и привода шнека 3 (ПШ) с одновременным включением светозвуковой сигнализации 7 (СЗС).

Система управления снабжена автоматической защитой от аварийных режимов работы ЛЭМД. В частности, при превышении температуры его обмотки по сигналу обратной связи от датчика температуры 12 (ДТ) производится отключение привода ПШ и ЭМС (рис.4.23).

При выходе из строя любого из коммутационных элементов КЭ1...КЭ3 обмотка сводообрушителя подключится к емкостному накопителю без формирования кратковременных импульсов напряжения. Якорь двигателя втянется в обмотку и обратного холостого хода не произойдет, что приведет к резкому повышению температуры.

Для защиты от данного аварийного режима предназначен датчик положения якоря 11 (ДП), при подаче управляющего сигнала которого более 2 с на дискретный вход ПЛК, происходит отключение привода шнека 3 и ЛЭМД сво- дообрушителя ЭМС.

Обозначение входов и выходов логического контроллера представлены в табл.4.2 [141,145].

Табл.4.2 – Глобальные входы и выходы ПЛК

№ п.п.	Наименование	Тип сигнала	Обозначение	Номер входа/вы- хода
ВХОДЫ				
1.	Кнопка запуска шнека	дискретный	pusk	in_1
2.	Кнопка остановки шнека	дискретный	stop	in_2
3.	Оптический датчик	дискретный	dat_optic	in_3
4.	Датчик температуры	аналоговый	dat_temp	in_4
5.	Датчик положения	дискретный	dat_polog	in_5
ВЫХОДЫ				
6.	Привод шнека	дискретный	shnek	q_1
7.	Коммутационный элемент 1	дискретный	kommut 1	q_2
8.	Коммутационный элемент 2	дискретный	kommut 2	q_3
9.	Коммутационный элемент 3	дискретный	kommut 3	q_4
10.	Свето-звуковая сигнализация 1	дискретный	signal 1	q_5
11.	Свето-звуковая сигнализация 2	дискретный	signal 2	q_6
12.	Свето-звуковая сигнализация 3	дискретный	signal 3	q_7

Результаты программирования контроллера в среде *CoDeSyS* на языке *CFC* представим в виде логических схем (рис.4.24 – рис.4.26).

При подаче на дискретный вход (рис.4.24) in_1 контроллера ПЛК сигнала от нормально разомкнутого контакта кнопки управления КУ «pusk» на входе SET функционального блока RS-триггера «RStrig1» формируется сигнал TRUE (истина или логическая единица). На выходе Q «RStrig1» устанавливается логическая единица, включая привод шнека «shnek» (дискретный выход q_1).

При отсутствии истечения муки из бункера 1 (рис.4.24), срабатывает фотоэлемент оптического датчика «dat_optic» (дискретный вход in_3), сигнал TRUE, формирующийся на выходе блока AND (побитное И), подается на вход CLK блока «Rtrig1», генерирующий единичный импульс на вход SET «RStrig2», на выходе которого устанавливается логическая единица. Сигнал

TRUE получает вход ENABLE функционального блока «Blinker 1» (генератор прямоугольных импульсов), программируемый так, чтобы обеспечить длительность импульса TIMEHIGH, например, 0,5 с ($t\#0.5s$), в течение которого на дискретный выход *kommut 1* будет подаваться логическая единица, и время паузы TIMELOW, например, 1 с ($t\#1s$) [77].

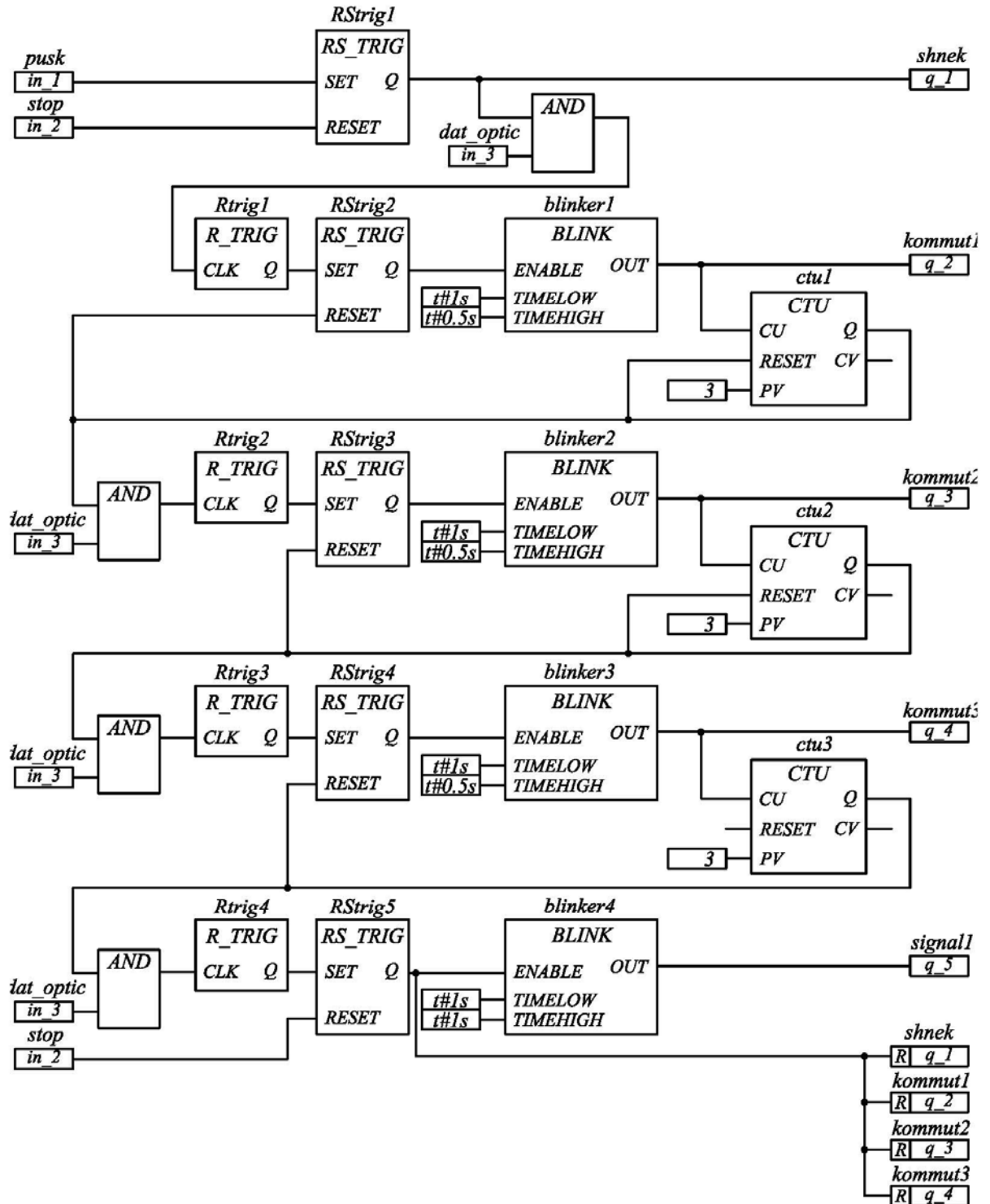


Рис.4.24 – Логическая схема САУ энергией удара сводообрушителя

Формирование управляющих импульсов на выходе q_2 ПЛК обеспечивает подключение обмотки электромагнитного сводообрушителя ЭМС (рис.4.23) и секции емкостного накопителя СЕН, заряженного до напряжения $0,6U_m$ [77,195].

Число импульсов с выхода OUT блока «Blinker1» фиксирует инкрементный счетчик «ctu1» и при достижении их количества, заданного на входе PV (например, 3), выход Q переходит в TRUE, подавая сигнал на вход RESET счетчика «ctu1» и сбрасывая его в ноль, и на вход блока «RStrig3», через R-триггер «Rtrig2». При этом характерной особенностью RS-триггера является то, что при одновременной подаче сигналов TRUE на его входы SET и RESET приоритет обеспечивается по входу RESET, то есть перевод выхода Q из TRUE в FALSE (ложь или логический ноль).

Если истечение муки не возобновляется, то по описанному выше алгоритму происходит включение выхода *komm2* 2 (дискретный выход q_3) с подключением к электромагнитному сводообрушителю дополнительной секции емкостного накопителя. Энергия удара по стенке бункера возрастает.

Светозвуковая сигнализация *signal* 1 (дискретный выход q_5) включается от генератора импульсов «Blinker 4» и свидетельствует об отсутствии течения муки после подачи через *komm3* 3 (дискретный выход q_4) максимального U_m напряжения на обмотку двигателя сводообрушителя. Одновременно происходит отключение выходов $q_1 - q_4$ [77].

Остановка шнека и сводообрушителя осуществляется от нормально разомкнутой кнопки *stop* (дискретный вход *in_2*).

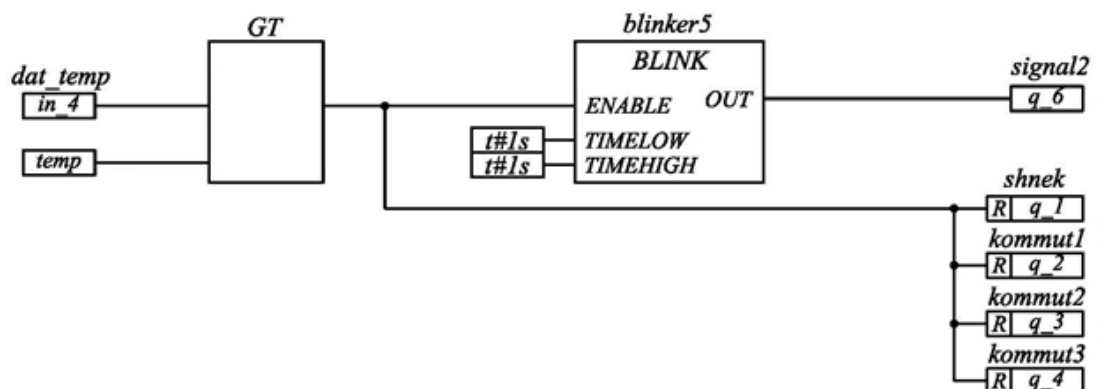


Рис.4.25 – Логическая схема защиты ЛЭМД от превышения температуры обмотки

Максимальная энергия удара обеспечивается при условии форсированного потребления электрической энергии двигателем сводообрушителя. При этом частое образование сводов приводит к многократным срабатываниям ЛЭМД и, как следствие, повышению температуры обмотки. Для защиты двигателя от перегрева разработана логическая схема (рис.4.25).

На входе функционального блока GT (двоичный оператор сравнения) подается сигнал от датчика температуры *dat_temp* (аналоговый вход *in_4*), сравнивается со значением *temp*, введенным оператором в соответствии с классом нагревостойкости обмотки. Если *dat_temp* > *temp*, то на выходе блока GT появляется TRUE, отключаются выходы *q_1* – *q_4*, запускается генератор прямоугольных импульсов «Blinker 5» и с заданной частотой включается свето-звуковая сигнализация *signal 2* (дискретный вход *q_6*).

При выходе из строя любого из трех коммутационных элементов, обмотка двигателя подключается к источнику без формирования униполярных импульсов напряжения. Якорь ЛЭМД совершает рабочий ход, а постоянная электромагнитная сила удерживает его в притянутом состоянии. Для защиты двигателя от данного аварийного режима на рис.4.26 представлена логическая схема [77,145].

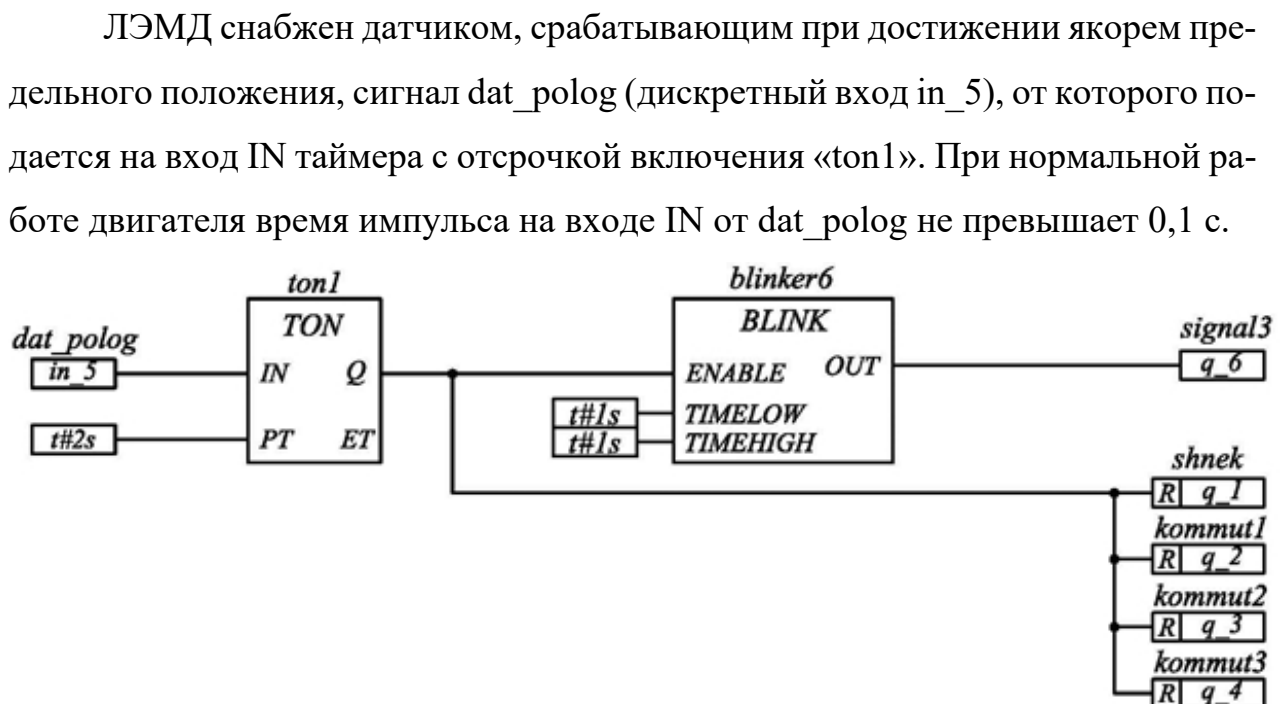


Рис.4.26 – Логическая схема защиты ЛЭМД сводообрушителя от «залипания» якоря

В случае аварийного режима, когда якорь втянут, например, более двух секунд, на выходе Q функционального блока «ton1» устанавливается сигнал TRUE, запускающий светозвуковую сигнализацию signal 3 (дискретный выход q_7) через генератор импульсов «Blinker 6» и отключающий выходы $q_1 - q_4$.

Предложенная усовершенствованная система автоматического управления с использованием программируемого логического контроллера и оптического датчика в качестве элемента обратной связи обеспечит автоматическое управление энергией удара ЛЭМД в составе электромеханической системы для разрушения сводов [77,195].

4.2.3 Автоматическое управление ЛЭМД в функции противодействующего усилия

Формирование питающих импульсов в рассмотренных в п.4.1 электрических преобразователях производится без учета необходимой плавности хода якоря ЛЭМД и согласования потребляемой мощности и нагрузки, что увеличивает динамические нагрузки на кинематические звенья и снижает срок службы всего привода [124]. Таким образом, обеспечение плавности рабочего хода якоря ЛЭМД, например, в приводе тросошайбового кормораздатчика или шприцевателя колбасного фарша, за счет автоматической корректировки потребляемой энергии при изменении свойств нагрузки представляется важным [84,87].

Варьирование выходного усилия F_m может достигаться воздействием на продолжительность энергопотребления либо на величину поступающей в обмотку ЛЭМД мощности p изменением подаваемого напряжения u при заданных свойствах обмотки. В большинстве известных электромеханических систем с ЛЭМД, питаемых от источников переменного тока, регулирование выходного тягового усилия F_m обеспечивается изменением длительности питающего импульса напряжения, которая выполняется, например, ручной настройкой

параметров времязадающей RC -цепи (например, электрические преобразователи, рассмотренные в [80,124,149]). Уровень напряжения питающего импульса не регулируется и ограничен значениями линейного или фазного напряжения источника питания.

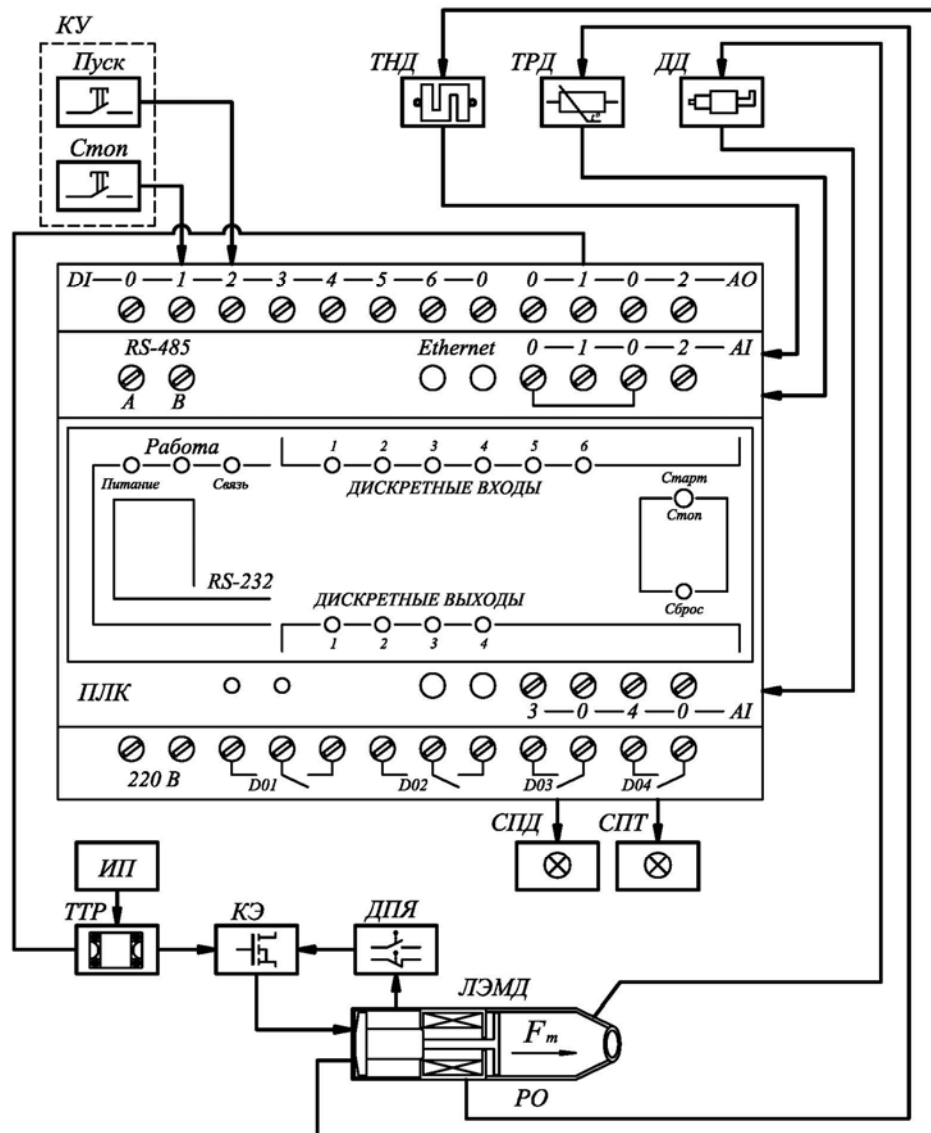


Рис.4.27 – Система автоматического управления плавным ходом якоря ЛЭМД: КУ – кнопки управления; ТНД – тензодатчик; ТРД – термодатчик; ДД – датчик давления; ИП – источник питания; ТТР – твердотельное реле; КЭ – коммутационный элемент; РО – рабочий орган; ЛЭМД – линейный электромагнитный двигатель; СПД – сигнализация превышения давления в фаршевом цилиндре; СПТ – сигнализация превышения температуры обмотки двигателя; ПЛК – программируемый логический контроллер.

Для достижения плавности хода якоря ЛЭМД предложен подход к реализации автоматической коррекции выходного усилия F_t линейного элект-

тромагнитного двигателя. Функциональная схема электрического преобразователя с программируемым логическим контроллером представлена на рис.4.27 [7,79].

Питание ЛЭМД осуществляется от источника питания ИП через твердотельное реле ТТР (рис.4.27). Дискретная подача электроэнергии обеспечивается коммутационным элементом КЭ, включение и отключение которого увязывается с предельным положением якоря и кнопками управления КУ [3,87].

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

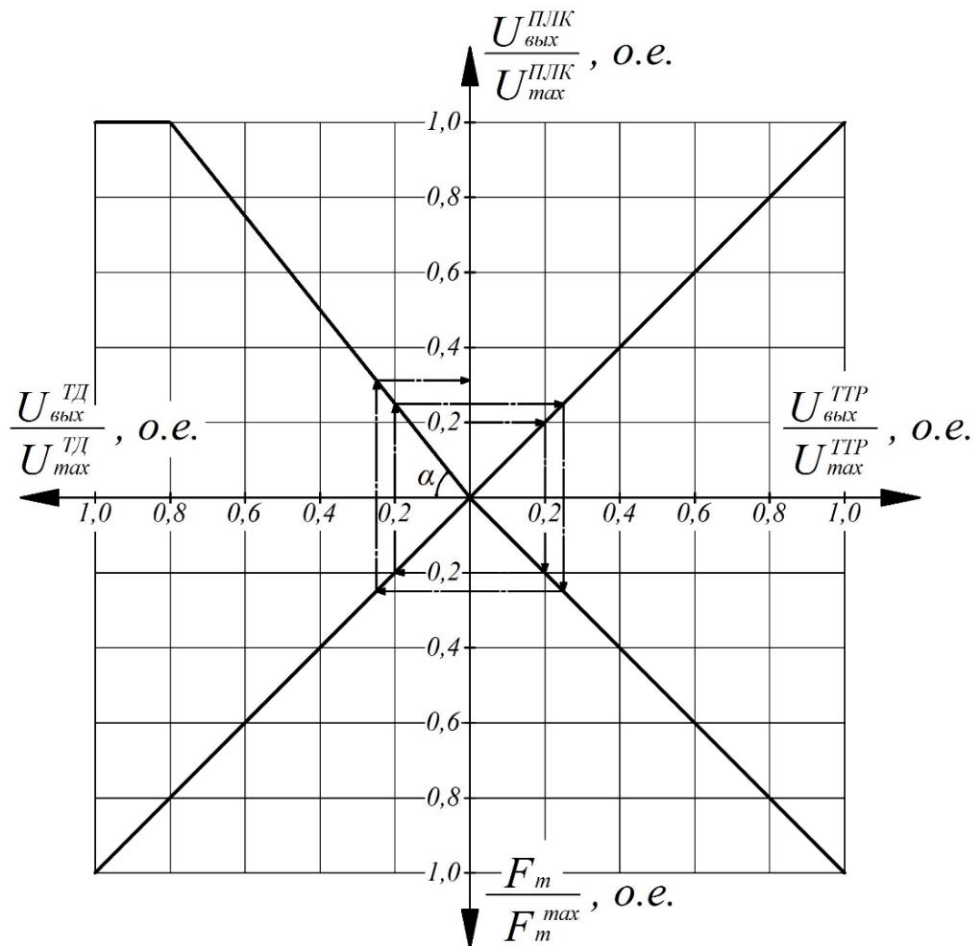


Рис.4.28 – Номограмма, поясняющая действие системы с автокоррекцией выходного тягового усилия

На рис.4.28 показана номограмма, поясняющая действие системы с автокоррекцией выходного тягового усилия F_T . В начальный момент времени напряжение, подаваемое на обмотку ЛЭМД через твердотельное реле ТТР с

управлением от программируемого логического контроллера ПЛК, составляет $U_{\text{вых}}^{\text{ТПР}} = 0,2 U_{\text{max}}^{\text{ТПР}}$ (рис.4.28). Якорь двигателя с рабочим органом РО под действием электромагнитной силы начинает плавное движение, одновременно сжимая тензодатчик ТНД (рис.4.27). Значение F_t , преобразованное в изменение напряжения $U_{\text{вых}}^{\text{ТД}}$ элемента обратной связи – тензодатчика ТД – подается на аналоговый вход ПЛК, где в соответствии с программой формируется выходной аналоговый сигнал напряжения $U_{\text{вых}}^{\text{ПЛК}}$ управления твердотельным реле ТТР (пунктирная линия на номограмме рис.4.28). Напряжение на обмотке повышается, увеличивая значение выходного тягового усилия F_t до тех пор, пока рабочий орган не начнет движение [3,87].

Таким образом, на обмотку ЛЭМД подается напряжение, при котором обеспечивается необходимое усилие для перемещения рабочего органа, например, транспортера или фаршевого поршня, и достигается плавность хода якоря ЛЭМД.

На рис.4.29 – рис.4.33 представлены логические схемы управления системой с автокоррекцией выходного тягового усилия машины с ЛЭМД и в табл.4.3 обозначены глобальные входы и выходы контроллера [141,145].

Табл.4.3 – Глобальные входы и выходы программируемого логического контроллера

№ п.п.	Наименование	Тип сигнала	Обозначение	Номер входа/выхода
ВХОДЫ				
1.	Кнопка запуска привода	дискретный	<i>pusk</i>	in_1
2.	Кнопка остановки привода	дискретный	<i>stop</i>	in_2
3.	Конечный выключатель	дискретный	<i>SQ</i>	in_3
4	Тензодатчик	аналоговый	<i>d_tenz</i>	in_4
5.	Датчик температуры	аналоговый	<i>d_temp</i>	in_5
6.	Датчик давления	аналоговый	<i>d_davl</i>	in_6
ВЫХОДЫ				
7.	Управление коммутационным элементом	дискретный	<i>LEMD-d</i>	q_1
8.	Сигнализация превышения температуры обмотки двигателя	дискретный	<i>Lamp_TD</i>	q_2
9.	Сигнализация превышения давления в фаршевом цилиндре	дискретный	<i>Lamp_DD</i>	q_3
10.	Управление твердотельным реле	аналоговый	<i>LEMD-a</i>	q_4

Условием для пуска машины с ЛЭМД, например, шприцевателя колбасного фарша, является логическая единица (*TRUE*) дискретного входа *in_1* (замкнутый контакт кнопки «Пуск» – *Pusk*, при ручном управлении) и логические нули (*FALSE*) дискретных входов *in_2* и *in_3* (разомкнутые контакты кнопки «Стоп» – *Stop* и конечного выключателя КВ – *SQ*), инверсия которых осуществляется с помощью функционального блока *NOT* и подается на блок *AND* (побитное И), на выходе которого устанавливается логическая единица. Запускается дискретный выход ПЛК *q_1* (*LEMD-d*) с подключенной обмоткой линейного электромагнитного двигателя (рис.4.29) [3,145].

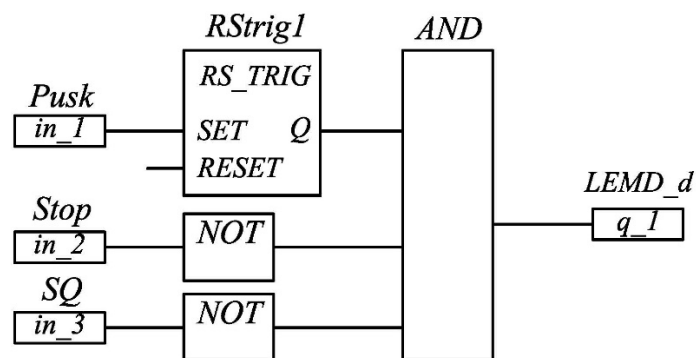


Рис.4.29 – Логическая схема управления пуском дискретной электромагнитной машины

Отключение ЛЭМД осуществляется нажатием аварийной кнопки «*Stop*» (*in_2*) либо конечным выключателем *SQ* (*in_3*) (рис.4.30).

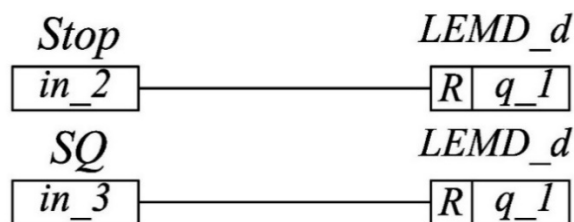


Рис.4.30 – Логическая схема остановки дискретной электромагнитной машины

Для обеспечения плавного пуска и хода якоря ЛЭМД сигнал от тензодатчика подается на аналоговый вход контроллера *in_4* (*d_tenz*) и сравнивается в функциональном блоке *GT* (больше) с заданным U_{tenz} (рис.4.31, а).

Если значение сигнала *in_4* будет больше U_{tenz} на выходе блока *GT* появляется *TRUE* (истина), запускается функциональный блок *Blinker1* (генератор прямоугольных импульсов) и с заданной частотой включается блок *ADD* (сложение), увеличивая текущее значение локального выхода *current* на ΔU_y .

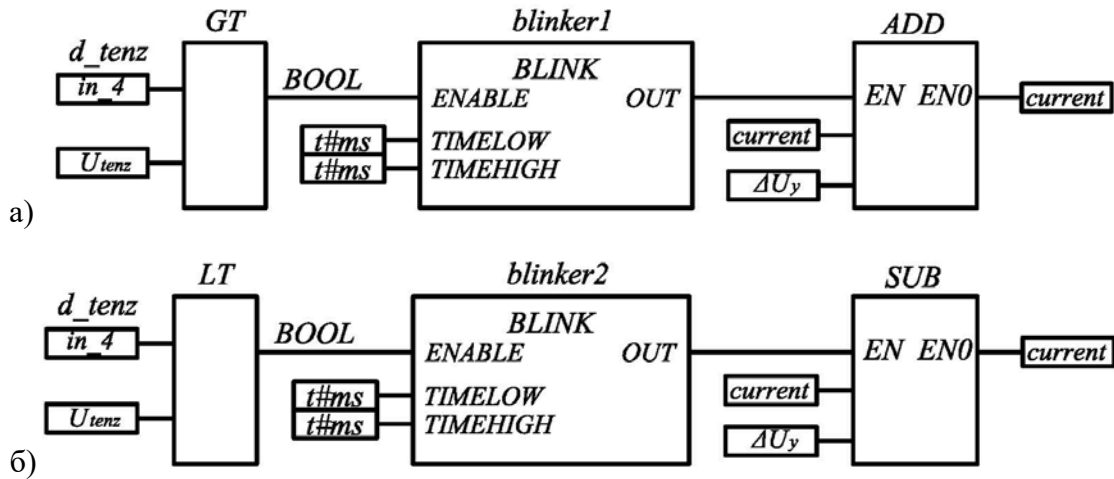


Рис.4.31 – Логические схемы управления плавным пуском и ходом якоря ЛЭМД.

При уменьшении аналогового сигнала с тензодатчика in_4 (d_tenz) выход с блока GT переходит в логическое состояние $FALSE$ и, если это значение становится меньше заданного U_{tenz} , логическая единица появляется на выходе блока сравнения LT . Запускается функциональный блок $Blinker2$ (генератор прямоугольных импульсов) и с заданной частотой включается блок SUB (вычитание), уменьшая текущее значение локального выхода $current$ на ΔU_y (рис.4.31, б) [3,141,145].

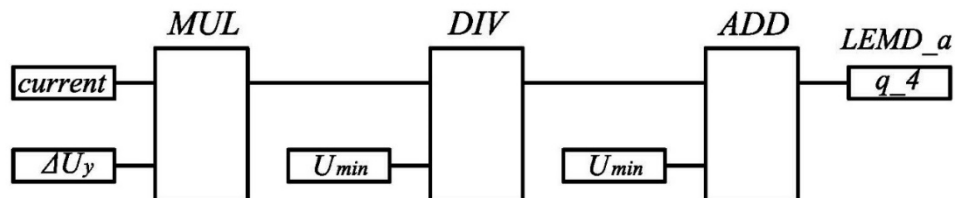


Рис.4.32 – Логическая схема управления аналоговым выходом ПЛК

Таким образом, изменяя текущее значение $current$ на ΔU_y можно добиться плавного изменения напряжения на аналоговом выходе q_4 ($LEMD_a$) и, как следствие, на входе твердотельного реле ТТР и обмотке ЛЭМД, увеличивая или уменьшая тяговое усилие в соответствии с нагрузкой (рис.4.32).

Логической схеме, представленной на рис.4.32 соответствует следующее математическое выражение:

$$U_y = \frac{current \cdot \Delta U_y}{U_{min}} + U_{min}, \quad (4.26)$$

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

При превышении температуры обмотки ЛЭМД или давления в фаршевом цилиндре сигналы, соответственно, от термодатчика ТРД или датчика давления ДД (рис.4.27) подаются на аналоговые входы контроллера in_5 (d_temp) и in_6 (d_davl), сравниваются в функциональных блоках GT («больше») с заданными (рис.4.33).

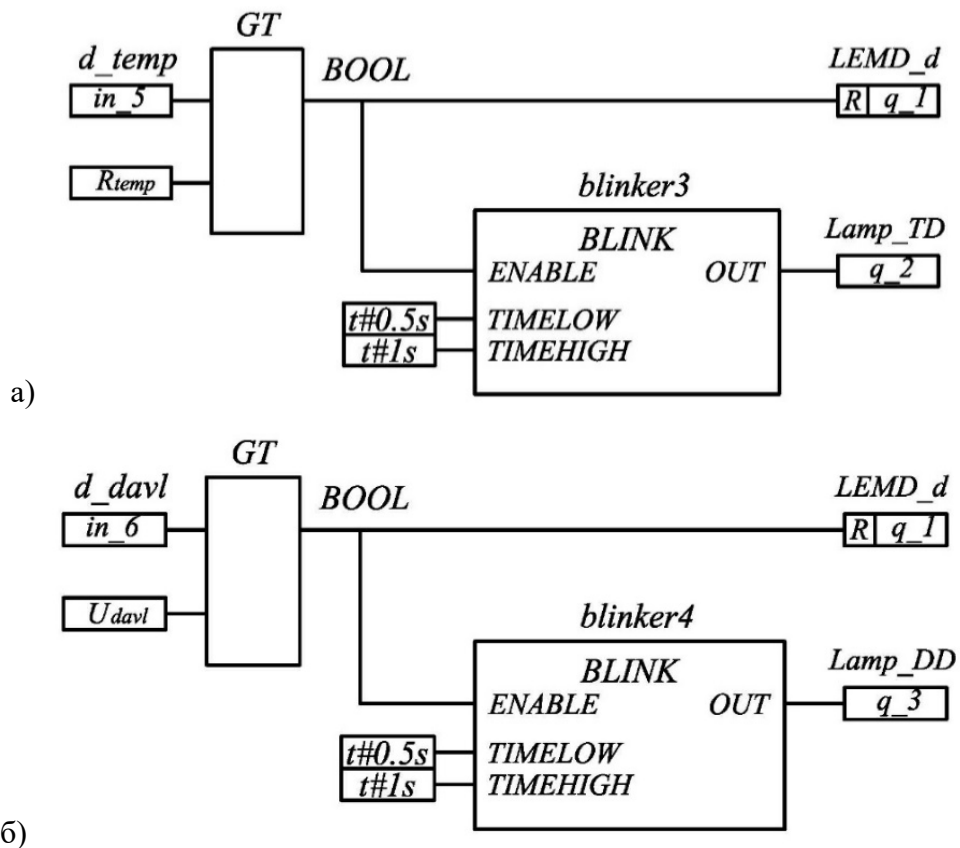


Рис.4.33 – Логические схемы защиты от перегрева обмотки ЛЭМД (а) и превышения давления в фаршевом цилиндре (б).

Если значение сигналов in_5 и in_6 будут превышать заданные оператором значения, на выходе блока GT появляется $TRUE$ (истина), отключается двигатель (q_1 – $LEMD_d$) запускаются функциональные блоки $Blinker3$ или $Blinker3$ (генератор прямоугольных импульсов) и с заданной частотой включается световая сигнализация q_2 – $Lamp_TD$ или q_2 – $Lamp_DD$.

Настройка скорости перемещения рабочего органа осуществляется оператором при программировании, изменением коэффициента пропорциональности k П-закона регулирования ПЛК (рис.4.34) [3,87]:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}}^{\max}}{U_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВХ}}^{\max}}, \quad (4.27)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВХ}}$ – выходное и входное напряжение ПЛК; $U_{\text{ВЫХ}}^{\max}$, $U_{\text{ВХ}}^{\max}$ – максимальные значения выходного и входного напряжения ПЛК, $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона статической характеристики (рис.4.34).

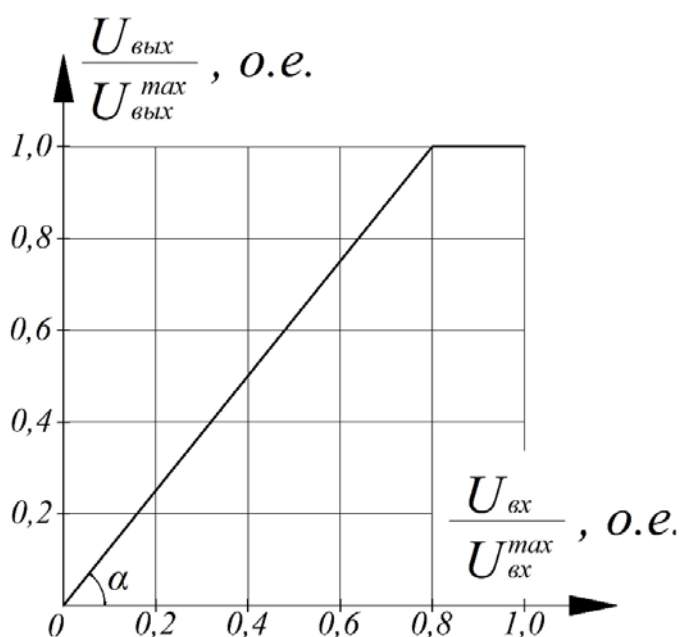


Рис.4.34 – Настроечная характеристика скорости перемещения рабочего органа

Таким образом, управляющая система с использованием программируемого логического контроллера и тензодатчика в качестве элемента обратной связи, обеспечивает плавность хода якоря ЛЭМД с одновременной автоматической корректировкой выходного тягового усилия в зависимости от изменения параметров нагрузки.

4.2.4 Автоматическое управление выходным усилием ЛЭМД в функции времени

Одним из основных выходных показателей, например, электромагнитного пресса для отжима сока, является тяговое усилие F_m ЛЭМД, которое по

мере перемещения штанги с поршнем и сжатия мезги не остается неизменным [221]. На практике, обычно, величину питающего напряжения выбирают так, чтобы обеспечить максимальное F_m для гарантированного завершения технологического процесса (ТП) отжима сока [221,230], что зачастую приводит к перегреву обмотки двигателя и, как следствие, уменьшению длительности работы и снижению КПД электромагнитного привода. Таким образом, согласование определяющей тяговое усилие F_T мощности питающего импульса с условиями процесса отжима сока, которая по мере перемещения рабочего органа и сжатия мезги автоматически увеличивается, представляется важным.

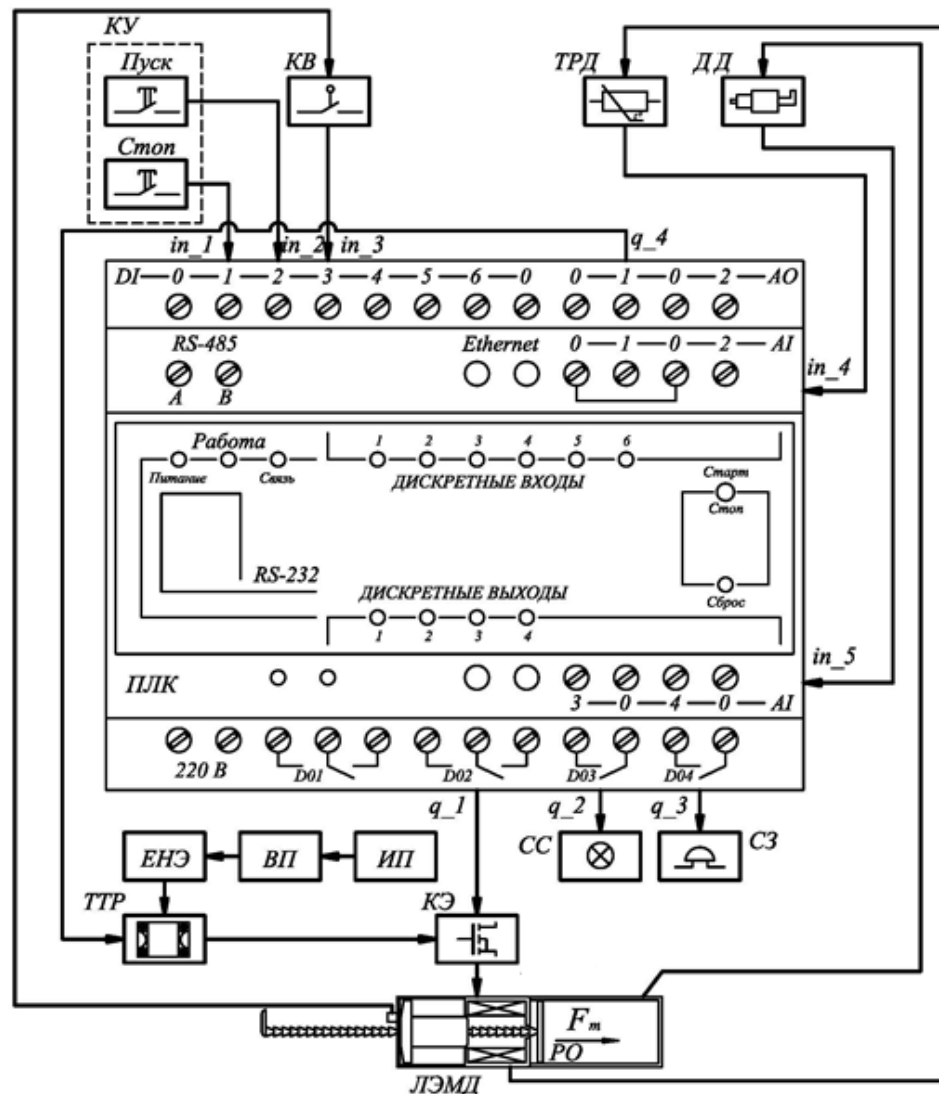


Рис.4.35 – Система управления электромагнитным прессом для отжима сока: КУ – кнопки управления; ТРД – термодатчик; ДД – датчик давления; ИП – источник питания; ТТР – твердотельное реле; КЭ – коммутационный элемент; КВ – конечный выключатель; РО – рабочий орган; ЛЭМД – линейный электромагнитный двигатель; СС – сигнализация световая; СЗ – сигнализация звуковая; ПЛК – программируемый логический контроллер; ВП – выпрямитель; ЕНЭ – емкостной накопитель энергии.

Сформулируем требования к системе автоматического управления (САУ) электромагнитным прессом для отжима сока:

- повышение на каждом рабочем ходе якоря напряжения ΔU_y питающего ЛЭМД импульса, пропорционального количеству ходов за время технологического процесса;
- обеспечение дискретного перемещения якоря шагового ЛЭМД с управлением в функции времени: время цикла $t_{\text{ц}}^1 = t_{\text{р}}^1 + t_{\text{п}}^1$, где $t_{\text{р}}^1$ – время работы ЛЭМД, $t_{\text{п}}^1$ – время паузы между последовательными срабатываниями;
- обеспечение паузы $t_{\text{п}}^2$ после трех срабатываний ЛЭМД для выхода сока из продукта;
- использование настроечного параметра для изменения ΔU_y в зависимости от вида перерабатываемого плодового сырья;
- обеспечение аварийной остановки электропривода при превышении температуры обмотки ЛЭМД и давления в отжимной камере.

Структурная схема предлагаемой системы представлена на рис.4.35. Питание ЛЭМД производится от источника переменного тока ИП через выпрямитель ВП. Для уменьшения влияния индуктивной нагрузки шагового ЛЭМД на сеть используется емкостный накопитель энергии ЕНЭ [195,196].

Табл.4.4 – Глобальные входы и выходы программируемого логического контроллера

№ п.п.	Наименование	Тип сигнала	Обозначение	Номер входа/выхода
ВХОДЫ				
1.	Кнопка запуска привода	дискретный	pusk	in_1
2.	Кнопка остановки привода	дискретный	stop	in_2
3.	Конечный выключатель	дискретный	SQ	in_3
4.	Датчик температуры	аналоговый	d_temp	in_4
5.	Датчик давления	аналоговый	d_davl	in_5
ВЫХОДЫ				
6.	Управление коммутационным элементом	дискретный	LEMD-d	q_1
7.	Сигнализация световая	дискретный	lamp	q_2
8.	Сигнализация звуковая	дискретный	zvonok	q_3
9.	Управление твердотельным реле	аналоговый	LEMD-a	q_4

Питающий импульс напряжения формируется на обмотке двигателя коммутационным элементом КЭ подачи управляющего на него с дискретного выхода программируемого логического контроллера ПЛК сигнала (q_1). Величина напряжения регулируется твердотельным реле ТТР в соответствии со значением управляющего напряжения U_y аналогового выхода ПЛК (q_4).

Включение (отключение) электромагнитного привода осуществляется кнопками управления КУ (дискретные входы ПЛК in_1 , in_2). При достижении рабочим органом предельного положения срабатывает конечный выключатель КВ (дискретный вход in_3) [7,82].

Обозначение глобальных входов и выходов контроллера приведены в табл.4.4 [141,145].

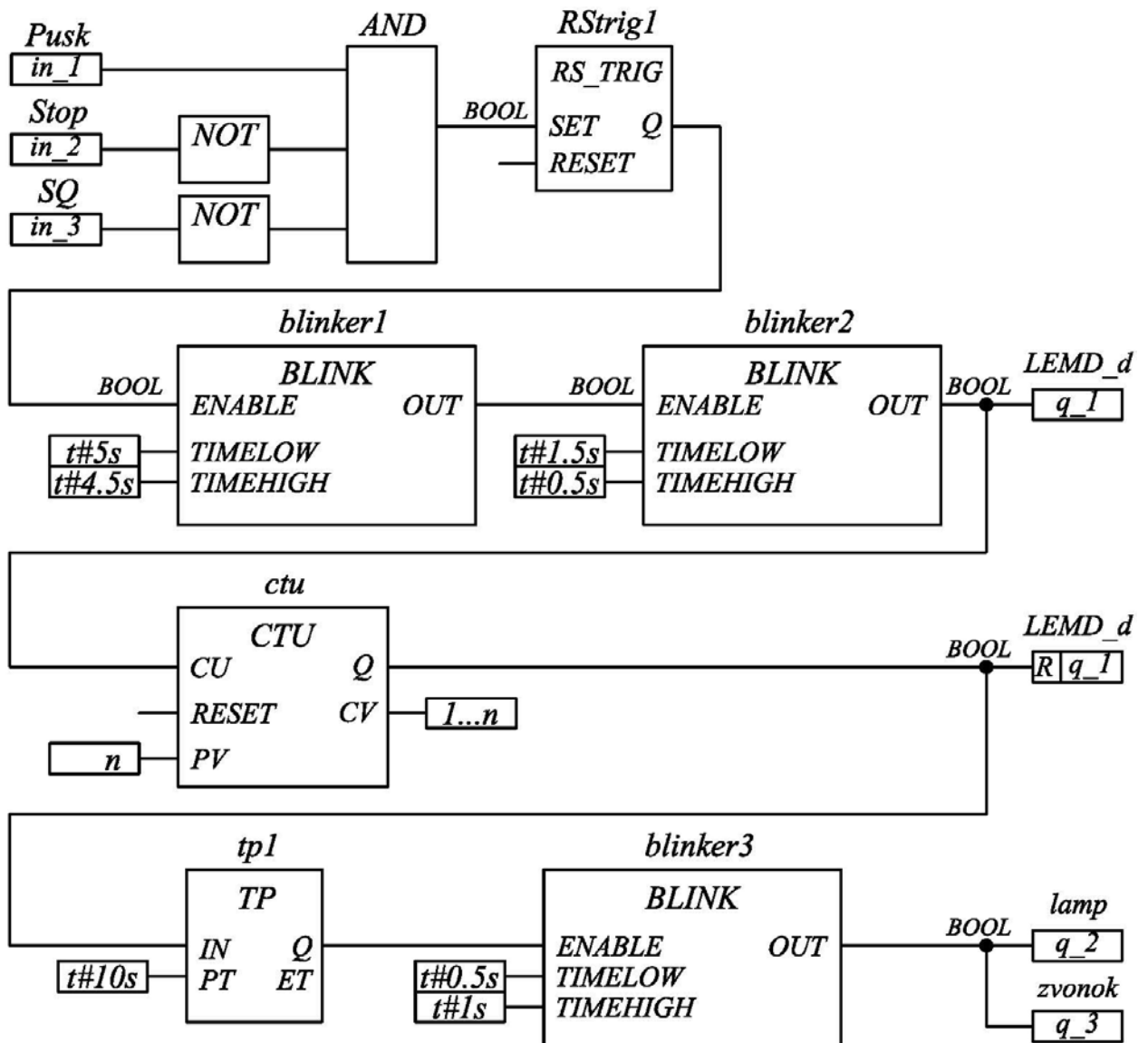


Рис.4.36 – Логическая схема управления электромагнитным прессом

При подаче на дискретный вход in_1 контроллера ПЛК сигнала $TRUE$ (истина или логическая единица) от нормально разомкнутого контакта кнопки управления КУ «*Pusk*» на входе $SET\ RS$ -триггера «*RStrig1*» формируется сигнал $TRUE$ при условии, что контакт «*Stop*» и конечный выключатель «*SQ*» разомкнуты (рис.4.36). На выходе Q «*RStrig1*» устанавливается логическая единица. Сигнал $TRUE$ получает вход $ENABLE$ функционального блока «*Blinker1*» (генератор прямоугольных импульсов) [7,145].

Генератор прямоугольных импульсов имеет входы: $ENABLE$ тип данных $BOOL$, $TIMELOW$ и $TIMEHIGH$ тип данных $TIME$; выход OUT тип данных $BOOL$. «*Blinker*» запускается по входу $ENABLE=TRUE$. Длительность импульсов задается $TIMEHIGH$, длительность паузы $TIMELOW$ [7,82].

Функциональный блок «*Blinker1*» программируется так, чтобы обеспечить время импульса $TIMEHIGH\ t_p^2$, в течение которого на вход $ENABLE$ блока «*Blinker2*» будет подаваться логическая единица, и время паузы $TIMELOW\ t_n^2$ (рис.4.36). При подаче сигнала $TRUE$ на вход $ENABLE$ блок «*Blinker2*» генерирует прямоугольные импульсы типа $BOOL$ на выходе OUT и дискретном выходе ПЛК q_1 ($LEMD-d$) с подключенной обмоткой линейного электромагнитного двигателя. Частота ходов якоря ЛЭМД задается функциональным блоком «*Blinker2*» – временем работы $TIMEHIGH\ t_p^1$ и временем паузы $TIMELOW\ t_n^1$. Таким образом, за время t_p^2 подачи $TRUE$ на вход «*Blinker2*» двигатель совершает три хода, после чего, в течение t_n^2 , на входе $ENABLE$ «*Blinker2*» сигнал $FALSE$ (ложь или логический ноль), ЛЭМД не работает (рис.4.36) [7,145].

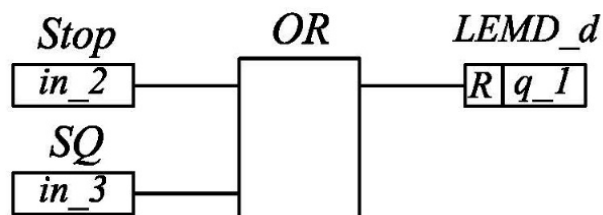


Рис.4.37 – Логическая схема управления остановкой электромагнитного пресса.

Система управления предполагает как ручное отключение привода с помощью кнопки управления КУ «Stop», так и автоматическое: либо с помощью конечного выключателя по достижении поршнем предельного положения (рис.4.37), либо при выработке заданного количества n срабатываний двигателя. Так, при невозможности ЛЭМД обеспечить усилие для сжатия мезги в конце хода поршня и достижения предельного положения, предусмотрено отключение двигателя после ограниченного числа его срабатываний, счет которых осуществляется функциональным блоком «CTu» (инкрементальный счетчик) [141,145], входы которого CU , $RESET$ и выход CV типа $WORD$ (рис.4.36). По каждому фронту на входе CU (переход из $FALSE$ в $TRUE$) выход CV увеличивается на 1. Выход Q устанавливается в $TRUE$, когда счетчик достигнет значения заданного PV , что приводит к отключению электромагнитного двигателя q_1 (LEMD-d).

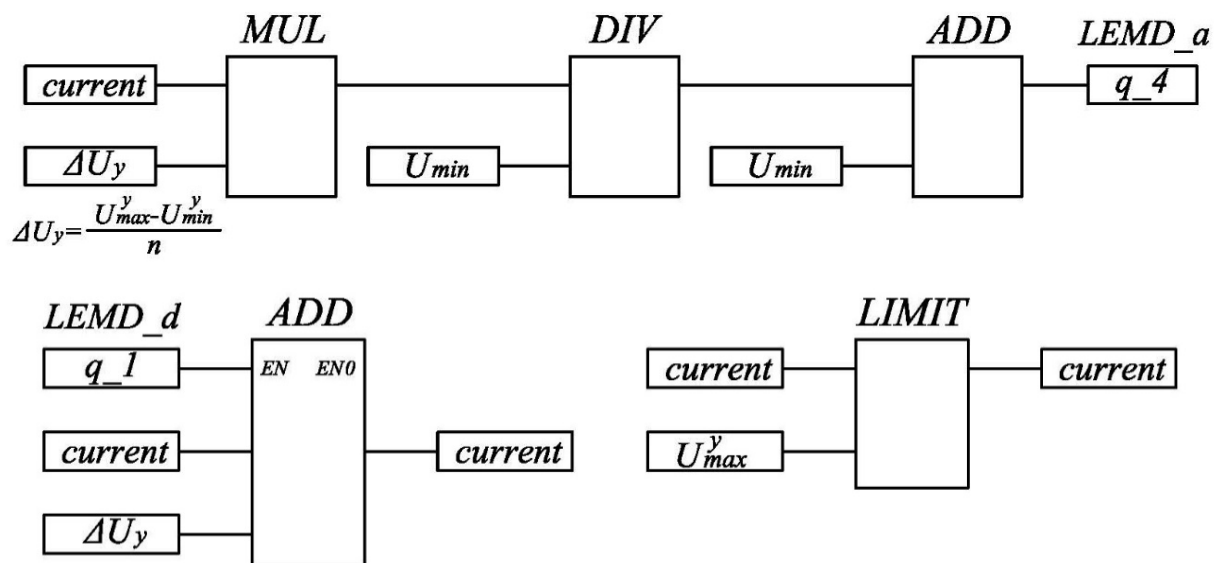


Рис.4.38 – Логические схемы управления аналоговым выходом ПЛК.

Окончание технологического процесса сопровождается световой (q_2 , *lamp*) и звуковой (q_3 , *zvonok*) сигнализацией, которая включается в соответствии с сигналом OUT генератора импульсов «Blinker3». Время работы сигнализаций задается с помощью функционального блока «таймер» «tp1».

Для плавного увеличения напряжения, подаваемого через твердотельное реле ТТР на обмотку ЛЭМД на каждом рабочем ходе, предусмотрена логическая схема, представленная на рис.4.38.

При каждом срабатывании ЛЭМД (q_1 LEMD-d) к текущему значению локального выхода *current* посредством функционального блока ADD (сложение) прибавляется $\Delta U_y = \frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n}$, где $U_y^{\max}$, $U_y^{\min}$ максимальное и минимальное напряжение на аналоговом выходе ПЛК; n – количество ходов ЛЭМД (рис.4.39) [7,82].

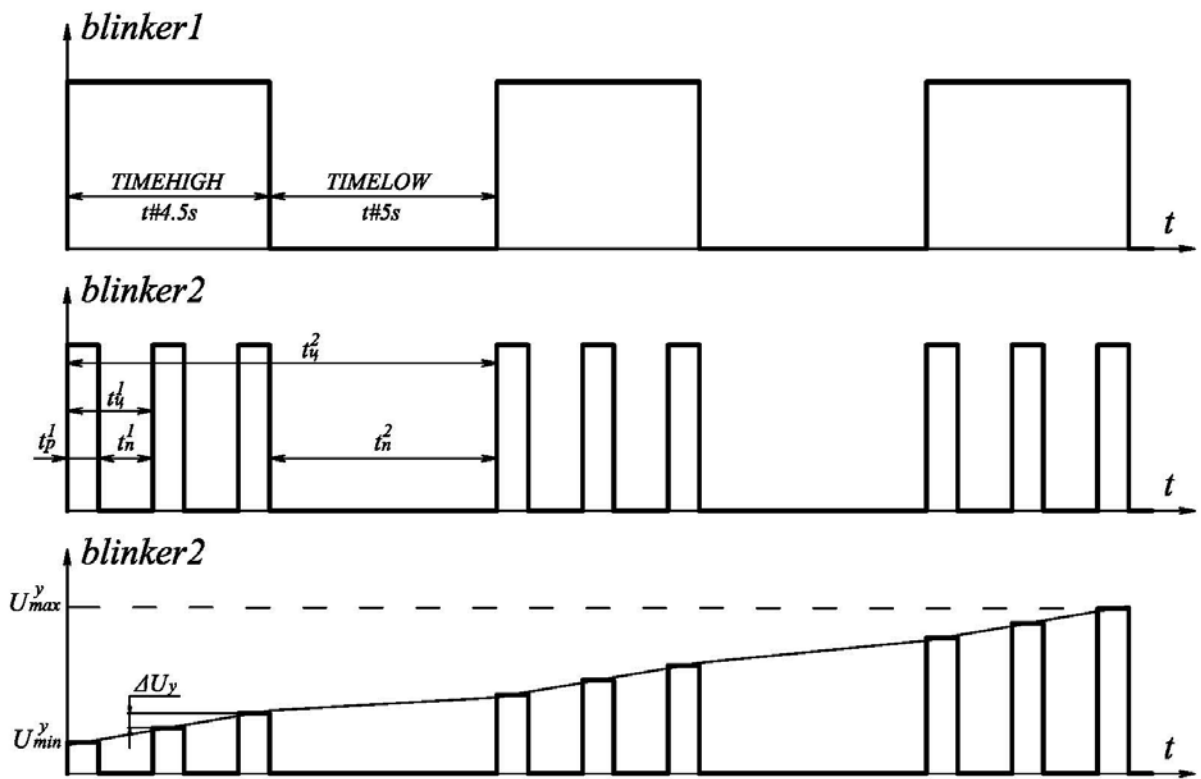


Рис.4.39 – Временные диаграммы работы системы управления электромагнитным прессом.

Таким образом, значение напряжения U_y на аналоговом выходе ПЛК q_4 (LEMD-a) будет зависеть от количества срабатываний (рис.4.39).

$$U_y = \frac{\text{current} \cdot \frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n}}{U_y^{\min}} + U_y^{\min} = \frac{\text{current} \cdot \Delta U_y}{U_y^{\min}} + U_y^{\min}. \quad (4.28)$$

Использование пресса для отжима различных видов плодов выдвигает задачу настройки системы управления в зависимости от силы сопротивления

$F_{см}$ мезги. При этом настроечным параметром может выступать приращение напряжения управления ΔU_y за один ход якоря ЛЭМД (рис.4.40).

Чем меньше величина $F_{см}$ ($F_{см}^1 < F_{см}^2 < F_{см}^3$), тем положе регулировочная характеристика и, соответственно, меньше значение ΔU_y необходимое на каждое срабатывание двигателя:

$$\Delta U_y^1 < \Delta U_y^2 < \Delta U_y^3 \text{ или } tg\alpha_1 < tg\alpha_2 < tg\alpha_3, \text{ так как } \Delta U_y = \frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n}, \text{ то}$$

$$\frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n_1} < \frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n_2} < \frac{U_y^{\max} - U_y^{\min}}{n_3},$$

где $\Delta U_y^1, \Delta U_y^2, \Delta U_y^3$ – приращение напряжений управления в зависимости соответственно от $F_{см}^1, F_{см}^2, F_{см}^3$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – угол наклона регулировочной характеристики в зависимости от $F_{см}^1, F_{см}^2, F_{см}^3$ соответственно; n_1, n_2, n_3 – количество ходов якоря ЛЭМД до достижения максимального выходного напряжения $\Delta U_y^{\max}$ ПЛК соответственно при $F_{см}^1, F_{см}^2, F_{см}^3$ (рис.4.40).

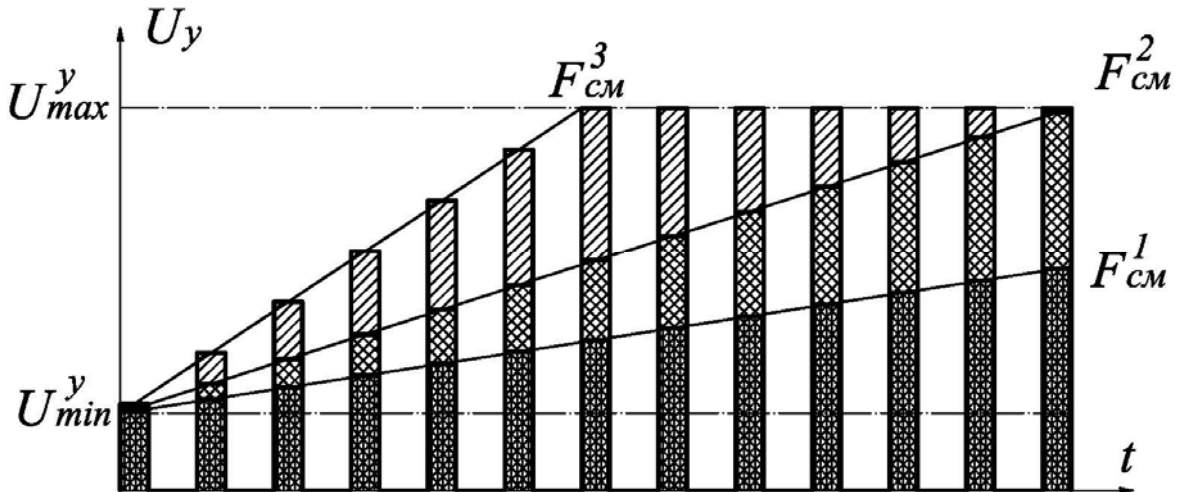


Рис.4.40 – Изменение выходного напряжения U_y ПЛК во времени

Ограничение максимального выходного напряжения $U_y^{\max}$ осуществляется с помощью блока *LIMIT* (рис.4.38) [145].

Система автоматического управления снабжена защитой привода от аварийных режимов работы. В частности, для защиты от перегрева обмотки

ЛЭМД и превышения давления в отжимной камере используются сигналы обратной связи соответственно от термодатчика ТРД и датчика давления ПД, при срабатывании которых отключается двигатель и включается световая и звуковая сигнализация (рис.4.35).

В качестве иллюстрации на рис.4.41 представлена идеализированная качественная диаграмма изменения механической мощности ЛЭМД на интервале $t_{\text{тп}}$ технологического процесса при отсутствии и реализации программной системы управления [7,82].

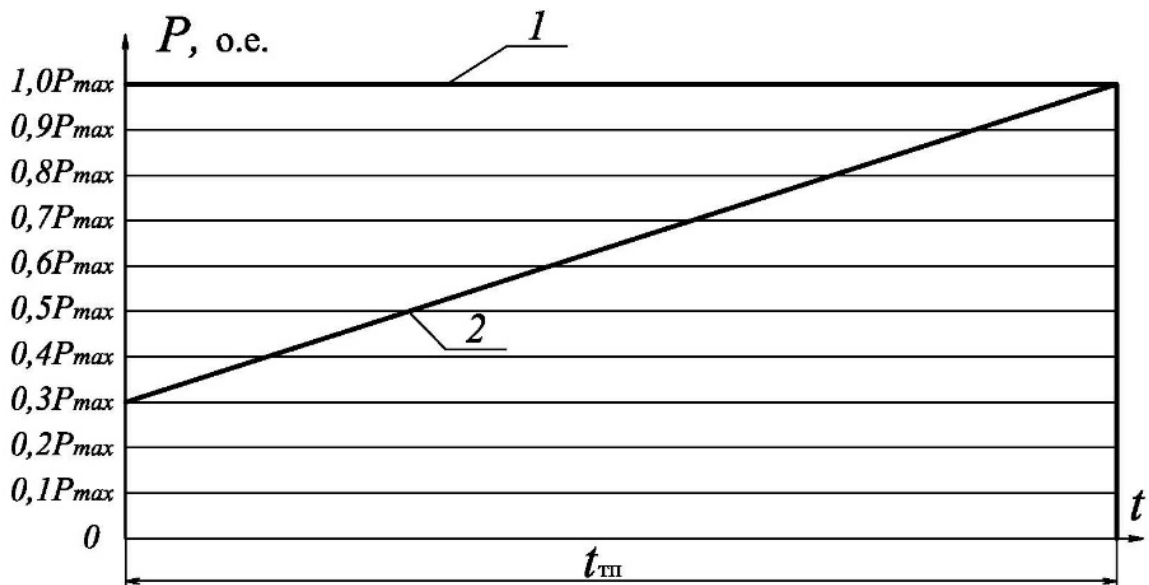


Рис.4.41 – Изменение мощности P ЛЭМД на интервале технологического процесса:
1 – характеристика в отсутствие программной системы управления; 2 – характеристика $P=f(t_{\text{тп}})$ с программной системой управления.

Если полагать, что при начальном напряжении источника обеспечивается 30 % значение мощности, отдаваемой ЛЭМД при максимальном напряжении, и существует линейная корреляция «напряжение источника – мощность ЛЭМД», то в программной системе регулирования при последовательном равномерном увеличении напряжения источника на интервале $t_{\text{тп}}$ можно рассчитывать на уменьшение отбираемой от источника энергии:

$$\frac{P_{\text{max}} - 0,65P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} 100\% \approx 35\%, \quad (4.29)$$

где P_{max} – максимальная мощность ЛЭМД.

4.3 Выводы по четвертой главе

Применение в ЛЭМД-приводах адаптивных управляющих систем, оценивающих в смежных циклах изменение нагрузки или свойства среды, позволяет:

- в системах ударного действия – снизить предопределяемую превентивной форсировкой избыточность выходной механической энергии на 20...30 % подстройкой параметров смежных совокупностей питающих электрических импульсов изменением характеристик источника питания;
- в системах неударного типа – скорректировать по нагрузке тяговое усилие, добиться плавности хода инструмента в каждом цикле изменением напряжения и мощности питающих импульсов в диапазоне 0,3...1,0 при одновременном снижении потребляемой от источника цикловой энергии до 35 % в сравнении с нерегулируемыми приводами.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ

5.1 Физические модели и особенности рабочих процессов ЛЭМД

5.1.1 Методика и технические средства эксперимента

Экспериментальные исследования рабочих процессов ударных и безударных ЛЭМД-приводов обусловлены необходимостью получения полной информации об их характеристиках. Выявленные закономерности позволяют предложить обоснованные рекомендации по рациональному выбору конструктивных и режимных параметров, обеспечить лучшие показатели привода. При этом определение и оценка переходных характеристик $u = f(t)$, $i = f(t)$, $\delta = f(t)$ – являются важной частью исследований по созданию ЛЭМД-приводов [60,95,131,136,146,195,196].

Физические модели и стенды для экспериментальных исследований, набор контрольно-регистрирующих приборов подробно рассмотрены в работах [60,95,111,146,149,195,196]. Структурная схема и общий вид физической модели для исследования ударных ЛЭМД-приводов показаны на рис.5.1, рис.5.2 [83,230,195,196,204].

Обратная связь по положению бойка ударной машины осуществляется датчиками $SQ1$ и $SQ2$, которые обеспечивают работу полупроводниковых коммутаторов и монтируются на корпусе ЛЭМД. При этом их положение может оперативно меняться в соответствии со шкалой Ш (рис.5.1).

Для исследования безударных ЛЭМД-приводов, например, транспортеров, разработан экспериментальный стенд (рис.5.3), общий вид которого представлен на рис.5.4 [121,124]. Основные элементы установки подробно рассмотрены в [76,86].

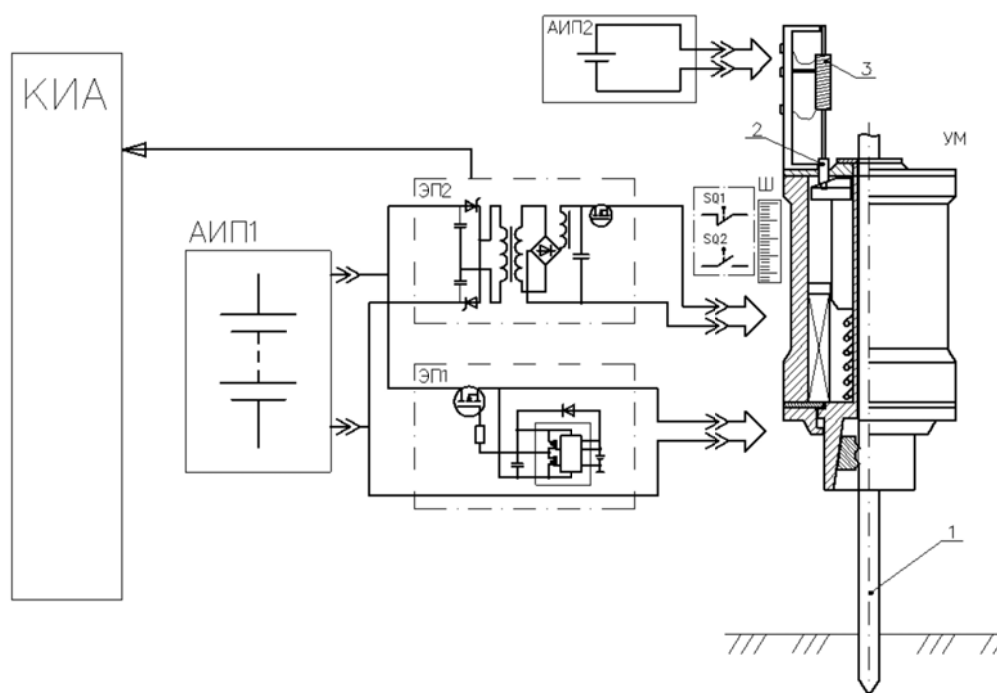


Рис.5.1 – Структурная схема стенда для исследования рабочих процессов ударного ЛЭМД-привода



Рис.5.2 – Общий вид физической модели для исследования ударных ЛЭМД-приводов: 1 – погружаемый стержневой элемент, 2 – ударная машина с линейным электромагнитным двигателем, 3 – электрический преобразователь, 4 – DC/DC-преобразователь, 5 – автономный (аккумуляторный) источник.

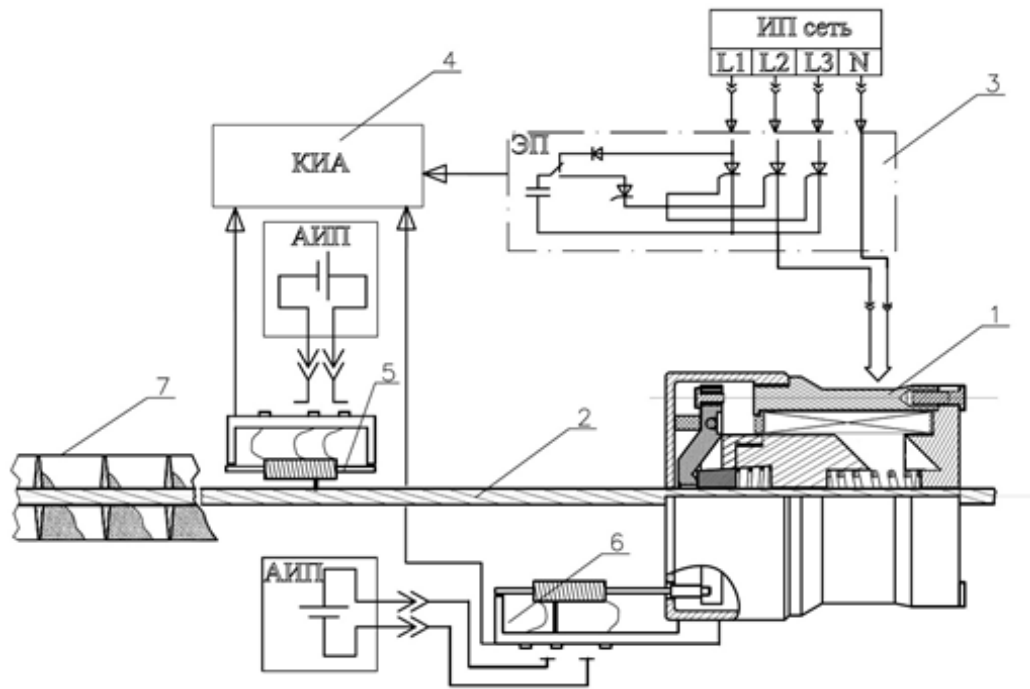


Рис.5.3 – Структурная схема стенда для исследования рабочих процессов безударного ЛЭМД-привода: 1 – линейный электромагнитный двигатель; 2 – исполнительный орган (трос или штанга); 3 – электрический преобразователь; 4 – контрольно-регистрирующие приборы; 5 – потенциометрический измерительный преобразователь хода исполнительного органа; 6 – потенциометрический измерительный преобразователь хода якоря ЛЭМД; 7 – нагрузка.

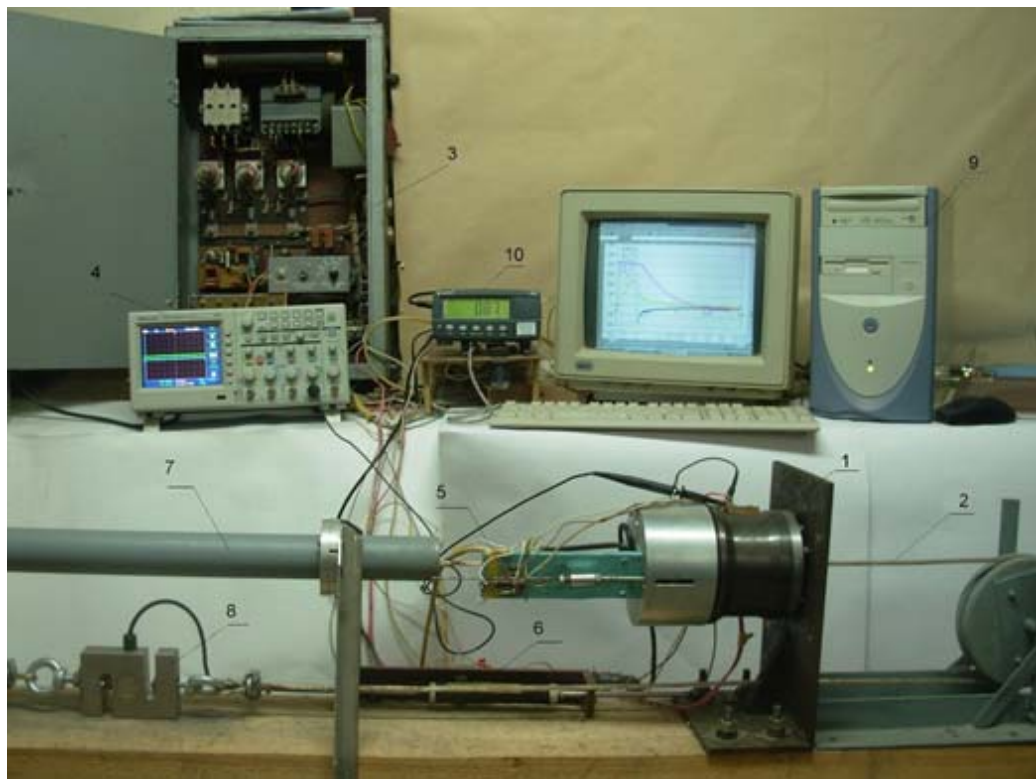


Рис.5.4 – Общий вид стенда для экспериментальных исследований: 1 – безударная машина с ЛЭМД-приводом; 2 – исполнительный орган (трос); 3 – электрический преобразователь; 4, 9 – регистрирующая аппаратура; 5, 6 – потенциометрические измерительные преобразователи; 7 – нагрузка, 8 – тензодатчик, 10 – электронный динамометр.

На рис.5.5 – рис.5.7 показаны схемы измерения и регистрации параметров единичных циклов срабатывания ЛЭМД [76,86,195,196].

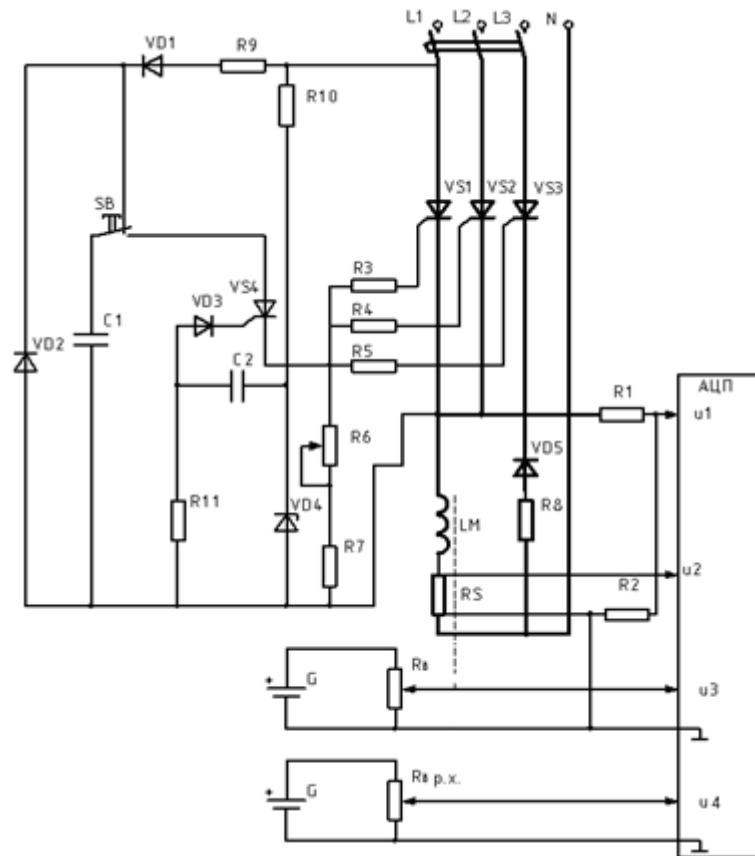


Рис.5.5 – Схема регистрации динамических характеристик при питании ЛЭМД от трехфазной сети.

Силовая часть электрического преобразователя, показанного на рис.5.5, выполнена на тиристорных ключах VS1–VS3, к которым подключена обмотка LM ЛЭМД.

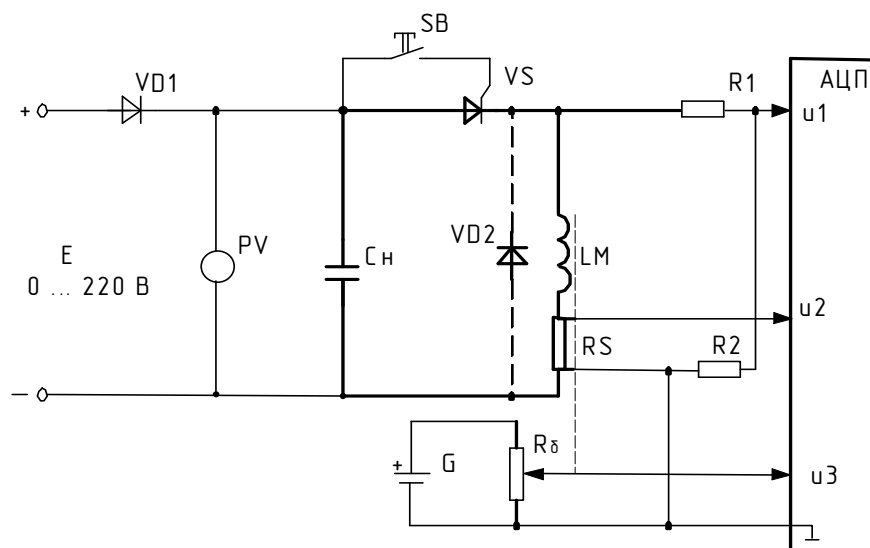


Рис.5.6 – Схема регистрации динамических характеристик при питании ЛЭМД от емкостного накопителя энергии.

Особенностью электрического преобразователя, представленного на рис.5.6, является использование емкостного (конденсаторного) накопителя энергии C_H . Управление двигателем производится подачей напряжения на его обмотку через тиристорный коммутационный элемент VS и осуществляется нажатием кнопки SB .

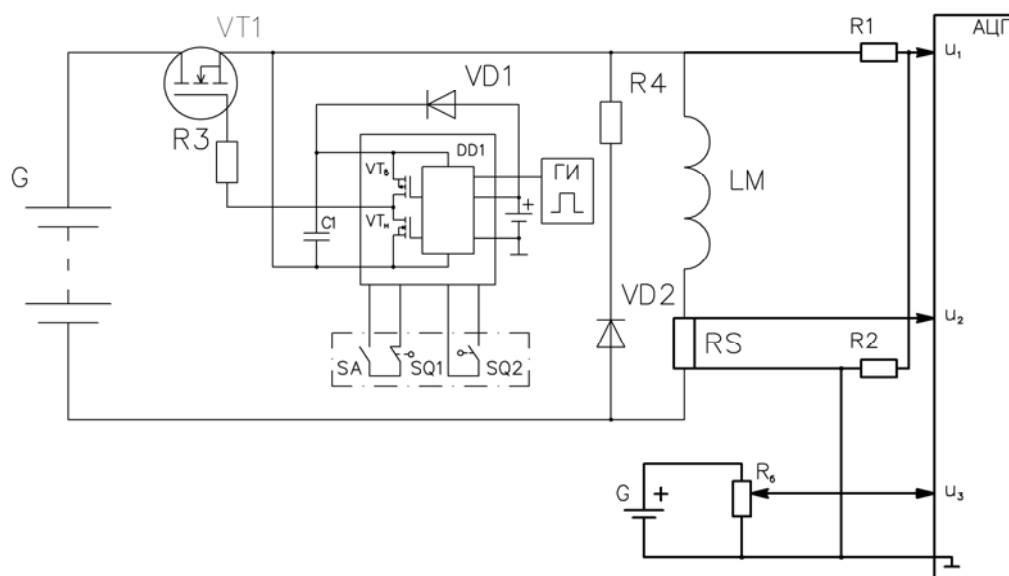


Рис.5.7 – Схема регистрации динамических характеристик при питании ЛЭМД от аккумуляторного источника.

Для управления машиной с ЛЭМД и ее питания от автономного аккумуляторного источника питания (АИП) на рис.5.7 представлена схема электрического преобразователя, содержащая собственно источник G , коммутационный элемент $VT1$, выполненный на транзисторе MOSFET, устройство управления как в функции времени, с помощью генератора импульсов ГИ, так и в функции положения якоря-бойка двигателя, с помощью элементов обратной связи $SQ1$ и $SQ2$, обмотку ЛЭМД, контрольно-регистрирующие приборы.

Для одновременной регистрации мгновенных значений напряжения $u = f(t)$, тока $i = f(t)$, перемещения якоря ЛЭМД $\delta = f(t)$ и исполнительного органа (например, троса) $\delta_{p.o.} = f(t)$ использовалась плата аналого-цифрового преобразователя АЦП [76,76,195,205].

Согласование значения входного напряжения u аналого-цифрового преобразователя и измеренного на обмотке ЛЭМД напряжения u_1 производится через делитель $R1, R2$ (рис.5.5-рис.5.7):

$$u = k_1 u_1 \quad (5.1)$$

где k_1 – постоянная, определяемая номиналами и соотношением $R1$ и $R2$.

Преобразование значений тока i обмотки линейного электромагнитного двигателя во входной сигнал напряжения АЦП обеспечивается стандартным измерительным шунтом $RS1$. Тогда с учетом постоянной k_2

$$i = k_2 u_2, \quad (5.2)$$

где k_2 – постоянная, определяемая номиналом измерительного шунта.

Тарировка потенциометрического измерительного преобразователя хода якоря и исполнительного органа R_δ произведена по методике [196]:

$$\delta = k_3 u_3 - k_4, \quad (5.3)$$

где k_3, k_4 – постоянные, определяемые характеристиками потенциометрического измерительного преобразователя хода.

Значения аналого-цифрового преобразователя обрабатываются таблицами *Excel Microsoft Office*, где выполняется построения переходных характеристик. Для определения требуемых величин были использованы выражения (табл.5.1).

Табл.5.1 – Основные выражения для оценки выходных энергетических показателей ЛЭМД

№ п/п	Физическая величина	Выражение	Пояснения
1	2	3	4
1	Потребляемая электрическая энергия ЛЭМД	$W_{эл} = \int_0^{t_{CP}} u(t)i(t)dt$	где $u(t), i(t)$ – значения напряжения и тока в обмотке ЛЭМД.
2	Энергия потерь в ЛЭМД	$Q = \int_0^{t_{CP}} i^2(t)Rdt$	где R – сопротивление обмотки ЛЭМД
3	Магнитная энергия	$W_{м} = \int_0^{t_{CP}} e(t)i(t)dt$	где $e(t) = u(t) - Ri(t)$ ЭДС ЛЭМД
4	Потокоцепление	$\psi = \int_0^{t_{CP}} e(t)dt$	–

1	2	3	4
5	Механическая энергия ЛЭМД	$A_{y\partial} = \frac{mv^2}{2}$	m, v – масса и предупредительная скорость якоря
6	Магнитный КПД	$\eta = \frac{A_{y\partial}}{W_{\text{мех}} + W_{\text{мо}}}$	$W_{\text{мо}}$ – остаточная магнитная энергия в ЛЭМД
7	Остаточная магнитная энергия в ЛЭМД	$W_{\text{мо}} = \int_0^{\Psi_k} i(t) d\Psi$	Ψ_k – конечное потокоцепление
8	Коэффициент магнитной энергии	$K_o = \frac{W_{\text{мо}}}{A_y + W_{\text{мо}}}$	–

Интегралы в выражениях табл.5.1:

$$\int f(x)dx = \sum_{i=1}^n 0,5[f(x_i) + f(x_{i+1})]\Delta t, \quad (5.4)$$

где Δt – приращение времени, соответствующее частоте дискретизации платы аналого-цифрового преобразователя ($\Delta t = 1$ мс).

Конечная скорость v определялась по динамической характеристике хода якоря $v = \delta(t)$ в некоторой точке x на интервале x_1, x_2 в конце хода якоря [195,196]:

$$\delta'(t) = \frac{\delta(x_2) - \delta(x_1)}{(x_2 - x_1)}. \quad (5.5)$$

Относительная ошибка при расчете значений $W_{\text{эл}}$ и КПД не превышает 2 % и 3 % соответственно. С учетом рекомендаций [157,195] число измерений не превышало пяти.

Важными выходными показателями ударных ЛЭМД-приводов являются механическая энергия $A_{y\partial}$ и ударная мощность $P_{y\partial}$, определяющее влияние на которые оказывает предупредительная скорость якоря-бойка двигателя. Для оперативности ее измерения использовался специальный контактный датчик. Принцип работы преобразователя, методика оценки значений скорости v и схема подключения представлены в приложении 6 [195,196,220].

Для определения силовых и энергетических показателей ЛЭМД использовалась методика [124,127,239], которая позволила получить семейство

статических тяговых характеристик $F_m = f(\delta)$ при постоянном значении тока в обмотке двигателя и различных значениях положения якоря.

$$F_m^{\text{макс}} = f(\delta), \text{ при } \int_0^t i(t) dt = \text{const}, \quad (5.6)$$

где $F_m^{\text{макс}}$ – максимальное значение тягового усилия ЛЭМД.

Для исследования использовался цифровой динамометр ДОУ-3-50И с тензодатчиком. Настройка и порядок подключения динамометра представлен в Приложении 7.

Предварительный анализ рабочих циклов ЛЭМД-приводов показал, что это многофакторные системы, характеризующиеся рядом независимых факторов и зависимыми параметрами. Определяющее влияние на выходные показатели ударных (механическую энергию, частоту ударов, КПД и др.) и безударных (тяговое усилие, частоту ходов, КПД и др.) ЛЭМД-приводов оказывают коэффициент жесткости z возвратной пружины, величина осевого канала, параметры емкостного (конденсаторного) накопителя энергии, длительность питающего импульса напряжения и др.

При изучении рассматриваемых многофакторных систем применялись два характерных для исследовательской практики метода: суперпозиции [131,149,196] и теории планирования экспериментов [17,96,111,154,195,255].

Метод суперпозиции показан на примере исследования ударного ЛЭМД-привода с выходной механической энергией до $A_{yo} \leq 50$ Дж, например, машины для неторцевой забивки длинных продольно-неустойчивых стержней, и безударной машины с тяговым усилием 1,5...3,0 кН.

Метод теории планирования многофакторного эксперимента (ТПМЭ) основан на том, что исследуемую функцию $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ можно разложить в ряд Тейлора [154,195]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{(n-1)n} X_{n-1} X_n + \\ + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2, \quad (5.7)$$

где β_0 – значение функции отклика в начале координат $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$;

$$\beta_i = \partial Y / \partial X_i; \beta_{ij} = \partial^2 Y / \partial X_i \partial X_j; \beta_{ii} = 0,5 \partial^2 Y / \partial X_i^2. \quad (5.8)$$

Выбранные факторы $X_1, X_2, \dots, X_n$ могут иметь и имеют разные порядки и размерность величин, что затрудняет вычисления. Поэтому в теории ПМФЭ для упрощения проведения экспериментальных исследований проводится кодировка значений факторов, связь с натуральными величинами факторов которых определяется выражением [17,154]:

$$\bar{X}_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i, \quad (5.9)$$

где X_{0i} – исходный уровень i -го фактора; ΔX_i – интервал варьирования i -го фактора.

Исходный уровень X_{0i} i -го фактора определим из соотношения:

$$X_{0i} = (X_{i.min} + X_{i.max}) / 2, \quad (5.10)$$

где $X_{i.min}, X_{i.max}$ – значения минимального и максимального уровней факторов соответственно.

Интервал варьирования определяется по выражению:

$$\Delta X_i = X_{i.max} - X_{0i} = X_{0i} - X_{i.min}. \quad (5.11)$$

Значения максимального $\bar{X}_{i.max}$ и минимального $\bar{X}_{i.min}$ уровней фактора в кодированном виде [83,154,195]:

$$\bar{X}_{i.max} = (X_{i.max} - X_{0i}) / \Delta X_i = +1, \quad (5.12)$$

$$\bar{X}_{i.min} = (X_{0i} - X_{i.min}) / \Delta X_i = -1. \quad (5.13)$$

$$\bar{X}_{0i} = (X_{0i} - X_{0i}) / \Delta X_i = 0. \quad (5.14)$$

Максимальный, минимальный и исходный уровни факторов в кодированных величинах равны соответственно «+1», «-1» и «0». Интервал варьирования ΔX_i :

$$\Delta \bar{X}_i = \bar{X}_{i.max} - \bar{X}_{0i} = 1. \quad (5.15)$$

Запишем ряд Тейлора (5.7) в виде регрессионного уравнения, предварительно проведя кодирование факторов с учетом интервалов их варьирования:

$$\begin{aligned} Y = & A_0 + A_1 \bar{X}_1 + A_2 \bar{X}_2 + \dots + A_n \bar{X}_n + A_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 + \dots + A_{(n-1)n} \bar{X}_{n-1} \bar{X}_n + \\ & + A_{11} \bar{X}_1^2 + A_{22} \bar{X}_2^2 + \dots + A_{nn} \bar{X}_n^2, \end{aligned} \quad (5.16)$$

где A_0, A_i, A_j, A_{ii} – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии уравнения (5.16) определим с учетом рекомендаций [83,154]:

$$A_0 = 1/m \sum_{j=1}^m Y_j - A_{11}/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 - \dots - A_{uu}/m \sum_{j=1}^m X_{ju}^2; \quad (5.17)$$

$$A_i = \sum_{j=1}^m X_{ij} Y_i / \sum_{j=1}^m (X_{ij})^2, \quad (i \neq 1); \quad (5.18)$$

$$A_{iu} = \sum_{j=1}^m X_{ij} X_{uj} Y_j / \sum_{j=1}^m (X_{ij} X_{uj})^2, \quad (i \neq 1); \quad (5.19)$$

$$A_{ii} = \sum_{j=1}^m \left(X_{ij} - 1/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 \right) Y_i / \sum_{j=1}^m \left(X_{ij}^2 - 1/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 \right)^2, \quad (5.20)$$

где j, i – номер опыта и факторов.

Для проверки соответствия данных, полученных экспериментально, и значений теоретических исследований, проводят оценку адекватности полученного полинома с помощью доверительных интервалов [17,154]. Наиболее показательным критерием оценки представляется критерий согласия Фишера [17,154]:

$$K_{fp} = [\max(D_a; D_{cp})] / [\min(D_a; D_{cp})], \quad (5.21)$$

где D_a, D_{cp} – дисперсия адекватности и средних значений.

Дисперсия адекватности:

$$D_a = 1 / (m - b) \sum_1^m (Y_{iэ} - Y_{ip})^2, \quad (5.22)$$

где $Y_{iэ}, Y_{ip}$ – средние значения измерений, полученные соответственно в ходе экспериментов и расчетов; b – количество коэффициентов регрессионного уравнения (5.16).

Дисперсию средних значений D_{cp} определим по выражению

$$D_{cp} = 1 / nm \sum_1^m (Y_i - \bar{Y})^2. \quad (5.23)$$

Уравнение регрессии (5.16) считается адекватным при

$$K_{fp} \leq K_{fm}, \quad (5.24)$$

где $K_{\phi m}$ – значение критерия Фишера по [154], при заданном количестве степеней свободы q .

Далее в главе проведен анализ динамических характеристик на примере электромагнитной ударной машины для погружения металлических стержневых элементов в грунт с использованием этого подхода [83,195].

В каждой серии экспериментов проводилась регистрация динамических характеристик. Для обработки полученных кривых использованы статистические методы обработки и анализа результатов экспериментов [17,154,157]. При этом предполагалось, что все проведенные измерения независимы и равноточны, грубые и систематические ошибки устранены, имеют место лишь случайные ошибки с нормальным законом распределения. В первом приближении регистрация проводилась для шести периодических циклов в установившемся режиме срабатываний ЛЭМД. Было выявлено, что результаты отдельных наблюдений устойчивы и наибольшая погрешность определения значений регистрируемых параметров по результатам экспериментов не превышает 5%. Количество измерений, обеспечивающих заданную точность, выбрано равным пяти [157].

5.1.2 Оценка рабочих процессов ЛЭМД, питаемого от аккумуляторного источника

Особенностью ЛЭМД-приводов переносных машин, например, для погружения стержневых элементов в грунт, является их использование в местах без электроснабжения. В этих случаях электропитание осуществляется от автономного источника, в частности аккумуляторного [195,196,248].

Рассмотрим явления, происходящие в электрической, магнитной, механической системах машины, электрического преобразователя и АИП в течение нескольких циклов, используя осциллограммы рабочих процессов, представленные на рис.5.8 и проанализируем энергопреобразовательные процессы в ЛЭМД с энергией удара до $A_{y0} \leq 50$ Дж, подключаемом к аккумуляторной батарее. Анализ временных диаграмм $u(t)$, $i(t)$, $\delta(t)$ рабочего процесса ЛЭМД

позволяет оценить влияние конструктивных особенностей и параметров питающих импульсов на энергетические показатели [195,196].

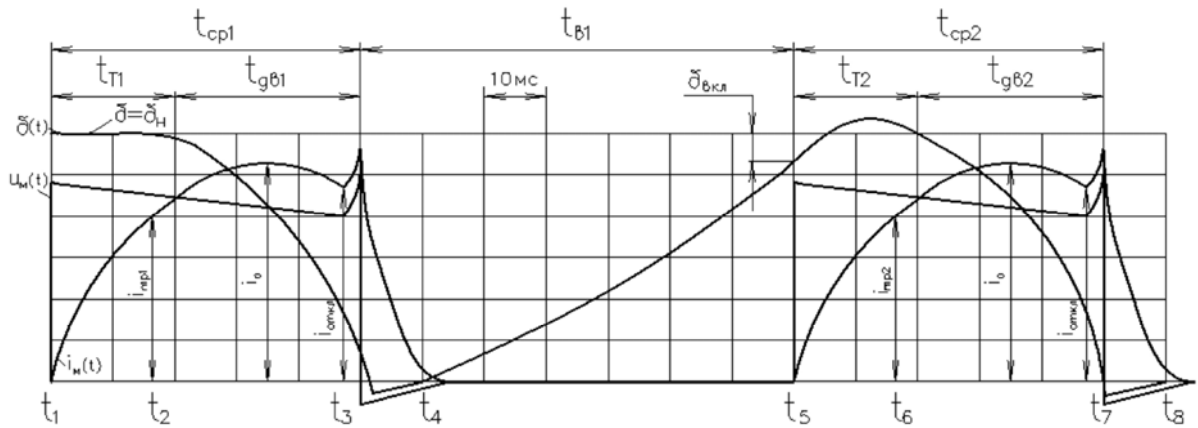


Рис.5.8 – Осциллограмма рабочего процесса электромагнитной ударной машины с аккумуляторным питанием

В момент t_1 подачи импульса напряжения $u_m(t)$ на обмотку якорь ЛЭМД под действием пружины занимает положение, соответствующее начальному рабочему зазору δ_n и неподвижен. Под действием приложенного напряжения u_m в обмотке появляется ток i_m , обеспечивающий нарастающую электромагнитную силу F_m . Одновременно с электромагнитной F_m , на якорь действуют согласно направленный вес P_6 и противоположно направленные силы трения $F_{тр}$ и упругости z пружины, благодаря чему до момента времени t_2 в механической системе сохраняется равновесие и якорь остается неподвижным [195,248].

К моменту времени t_2 ток в обмотке возрастает до значения i_{mp1} и под действием веса и электромагнитной силы якорь начинает движение, преодолевая противодействие сил z и $F_{тр}$.

Интервал $t_2 - t_3$ сопровождается дальнейшим увеличением тока i_m . В момент t_3 при зазоре δ , близком к нулю, происходит удар по наковальне с зажатым стержнем. Таким образом, этот этап энергопреобразования в ЛЭМД характеризуется: в электрической системе – потреблением электрической энергии источника с одновременным преобразованием ее в теплоту и в магнитную энергию, часть которой аккумулируется в магнитной системе двигателя, а часть расходуется на механическую работу и в механической системе

имеет место ускоренное, под действием электромагнитных сил, движение якоря с уменьшением зазора.

После втягивания якоря в обмотку датчиком нижнего положения формируется сигнал, отключающий ЛЭМД от источника питания. Поступление энергии источника в двигатель прекращается. Благодаря имеющемуся в магнитной системе неизрасходованному запасу энергии в обмотке машины некоторое время $\Delta t = t_4 - t_3$, поддерживается ток, замыкающийся по цепи гашения поля. При этом на якорь продолжает действовать электромагнитное усилие, превосходящее силу упругости z пружины, и он остается втянутым в обмотку и неподвижным. Промежуток времени Δt характеризуется отсутствием энергопотребления от внешнего источника и превращением некоторой доли неизрасходованной магнитной энергии машины в теплоту в контуре гашения [149,196].

По завершении этих процессов в момент t_4 возвратная пружина обеспечивает холостой ход. Очередной рабочий цикл машины характеризуется отличной от нулевой отрицательной (под действием пружины) скоростью движения якоря.

Изменившиеся условия предопределяют отличие и особенность процесса энергопреобразования в машине в последующих рабочих циклах.

Совершающий под действием пружины холостой ход якорь в момент времени t_5 воздействием на датчик верхнего положения формирует сигнал, вновь подключающий обмотку к источнику питания. Это воздействие соответствует зазору $\delta_{вкл}$, который может отличаться от начального δ_n , т.е. $\delta_{вкл} \leq \delta_n$. При этом появление питающего импульса на обмотке машины сопровождает окончание холостого хода якоря, обладающего некоторым запасом кинетической энергии, приобретенной действием пружины [149,195].

Для удобства сравнения и дальнейшего анализа процессов энергопреобразования в системе введем обозначения параметров рабочего цикла. Из временных показателей, определяющих этапы этого цикла, выделим интервалы: t_T – трогания; $t_{\partial\partial}$ – движения; $t_{cp} = t_T + t_{\partial\partial}$ – срабатывания; t_v – возврата;

$t_u = t_{cp} + t_e$ – цикла. Из электрических характеристик отметим следующие мгновенные значения тока i_m : i_{mp} – трогания; $i_{откл}$ – отключаемый ток. Из механических параметров цикла выберем скорость движения якоря: V_0 – начальная, в момент появления питающего импульса; V_6 – конечная, соударения якоря с буфером на этапе холостого хода; V_y – предупредная, на рабочем ходе якоря.

Сравним характеристики рассмотренных первого и последующих циклов и выделим факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на процесс энергопреобразования в электромагнитном приводе. Сопоставление осциллограмм (рис.5.8) показывает, что первый рабочий цикл в сравнении с последующими, характеризуется: большими интервалом срабатывания t_{cp} , длительностью тока i_m в обмотке; меньшими интервалом t_T и мгновенным значением тока i_{mp} на этапе трогания якоря; повышенными уровнем электропотребления $W_{эл}$ и потерями, меньшей эффективностью преобразования электрической энергии в магнитную и механическую, о чем свидетельствует меньшая предупредная скорость V_y якоря. Повышенные продолжительность и энергозатраты этого рабочего цикла объясняются первоначальным, начинающимся всегда с нулевого уровня, аккумулярованием доли потребляемой энергии в возвратной пружине. В дальнейшем, во всех последующих циклах, происходит лишь некоторое пополнение этого, сделанного в первом цикле запаса, поскольку аккумулярованная механическая энергия участвует в последующих циклах энергопреобразования [195,248].

Сопоставление полученных осциллограмм свидетельствует, что потери в обмотке машины по величине превосходят другие виды потерь и составляют до 33 % потребляемой энергии. Характерной особенностью энергопреобразования от аккумуляторного источника питания являются незначительные (не более 1%) потери в стали ЛЭМД, что объясняется пониженным значением и прямоугольной формой подаваемых на обмотку питающих импульсов напряжения.

5.1.3 Оценка рабочих процессов ЛЭМД, питаемого от емкостного накопителя энергии

Особенности энергопреобразований в ЛЭМД, питаемого от емкостного накопителя энергии, одно- и частотударных машин следует рассматривать в отдельности, поскольку они различаются компоновкой, алгоритмами управления и способами формирования питающих импульсов, требованиями к значениям и приоритету показателей эффективности циклов энергопреобразований. Подробно рабочие процессы в редкоударной системе с конденсаторным источником рассмотрены на примере электромагнитного сводообрушителя в [179]; в частотударной – на примере энергопреобразований в машине для погружения стержневых элементов в грунт [228].

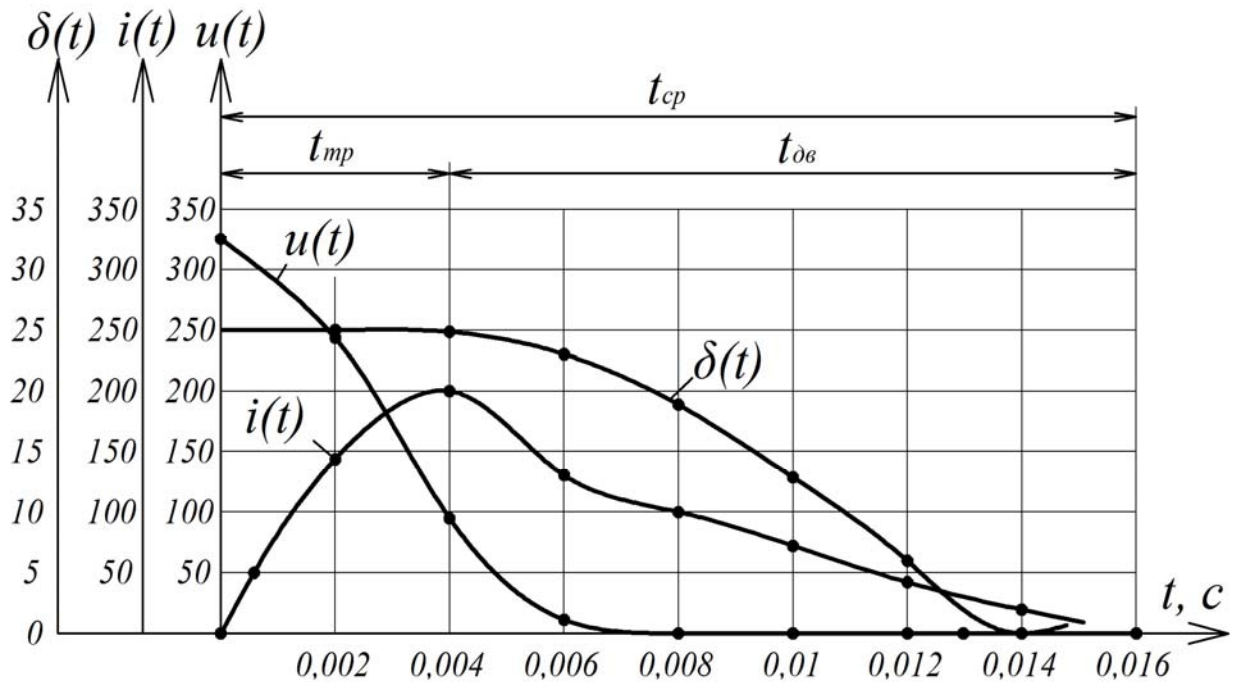


Рис.5.9 – Динамические характеристики двигателя при питании от емкостного накопителя энергии ($C=0,1C_H$); $\delta=r_l$

Для наглядности сопоставления на рис.5.9 и рис.5.10 показаны динамические характеристики рабочих циклов ЛЭМД-приводов, позволяющие оценить влияние параметров накопителя на выходные показатели привода [195,196,207].

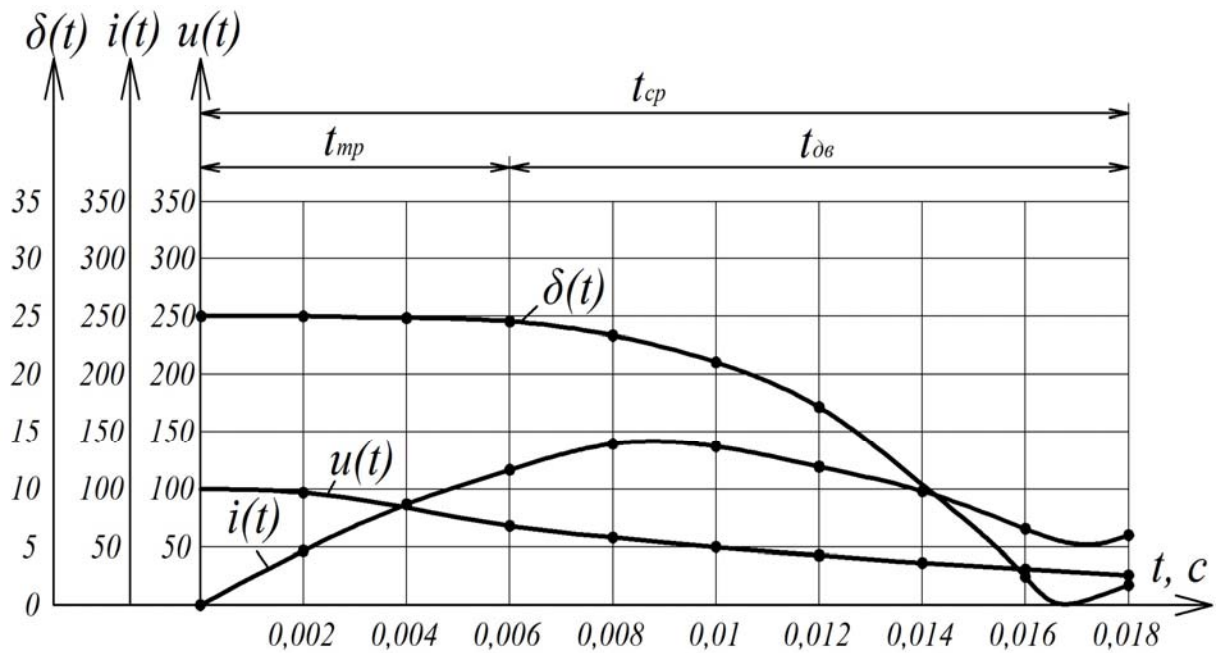


Рис.5.10 – Динамические характеристики двигателя при питании от емкостного накопителя энергии ($C=C_H$); $\delta=r_l$.

Влияние показателей и условий переходных процессов разряда конденсаторного источника на обмотку ЛЭМД в сравниваемых циклах энергопреобразовательных процессов двигателя целесообразно оценить с помощью энергетических диаграмм в осях «потокосцепление ψ – ток i » (рис.5.11) [195,196,207].

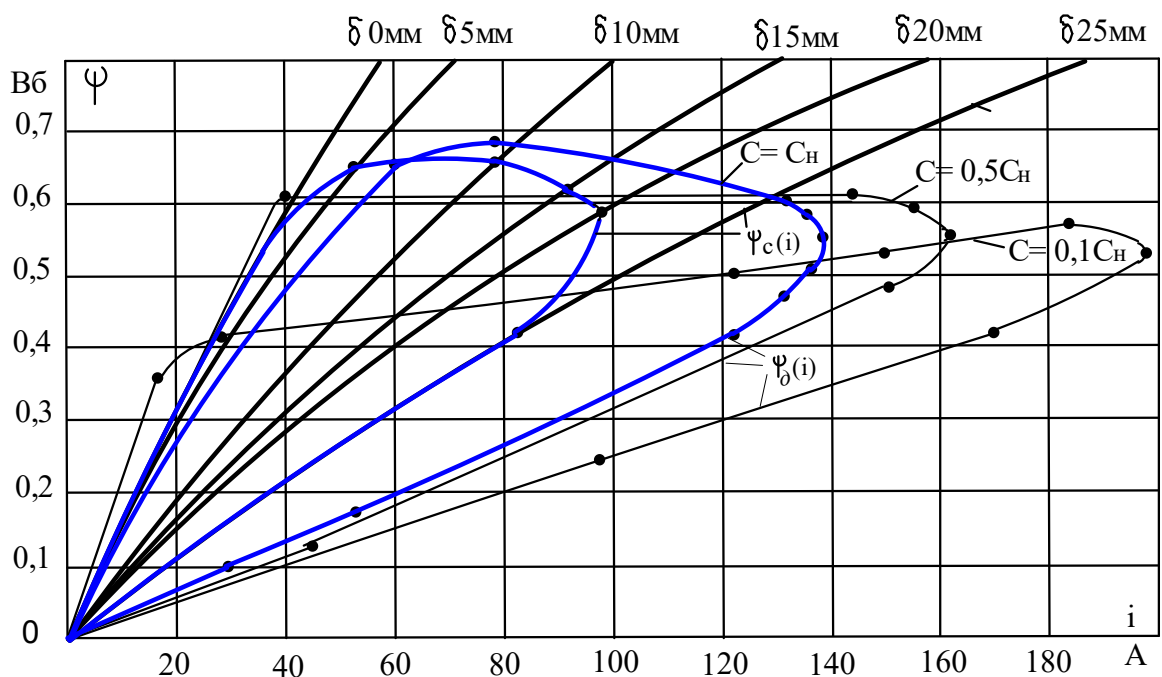


Рис.5.11 – Энергетические диаграммы ЛЭМД при питании от емкостного накопителя энергии

Рассмотрим энергопреобразования в ударных ЛЭМД-приводах, питаемых от конденсаторных источников, при непрерывных срабатываниях. На рис.5.12 приведены схемы силовых импульсных источников питания ЛЭМД. Отличие схем определяется количеством конденсаторных батарей и запасаемой электрической энергией $W_{эл}$. Устройства обеспечивают однополярный режим работы конденсаторов по напряжению и позволяют использовать в качестве накопителей энергии электролитические конденсаторы с высокими удельными показателями.

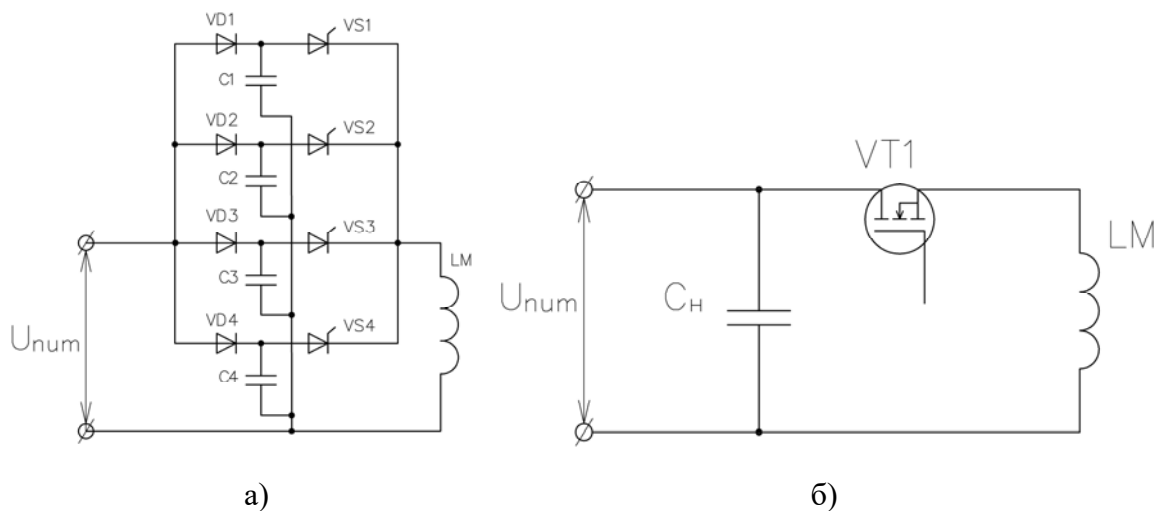


Рис.5.12 – Схемы импульсных источников: а – с секционированной конденсаторной батареей; б – с одной конденсаторной батареей.

Наиболее эффективным представляется энергопреобразование в ЛЭМД при питании от секционированной конденсаторной батареи (рис.5.12,а). Четыре группы емкостных накопителей энергии $C1 - C4$ заряжаются одновременно от источника постоянного тока. Передача энергии конденсаторов в обмотку LM ЛЭМД осуществляется силовыми тиристорами $VS1 - VS4$. При отпирании тиристора $VS1$ в момент времени t_0 (рис.5.13) конденсатор $C1$, разряжаясь на обмотку LM , вызывает срабатывание ЛЭМД. К концу рабочего хода t_1 конденсаторная батарея $C1$ разряжается, и якорь совершает холостой ход [195,207].

В следующий момент времени t_2 открывается тиристор $VS2$, что приводит к разряду батареи $C2$ и очередному срабатыванию ЛЭМД. Далее последовательно разряжаются $C3$ и $C4$. Таким образом, к моменту совершения ра-

бочего хода при питании от емкостной батареи $C4$, $C1$ успевает полностью зарядиться.

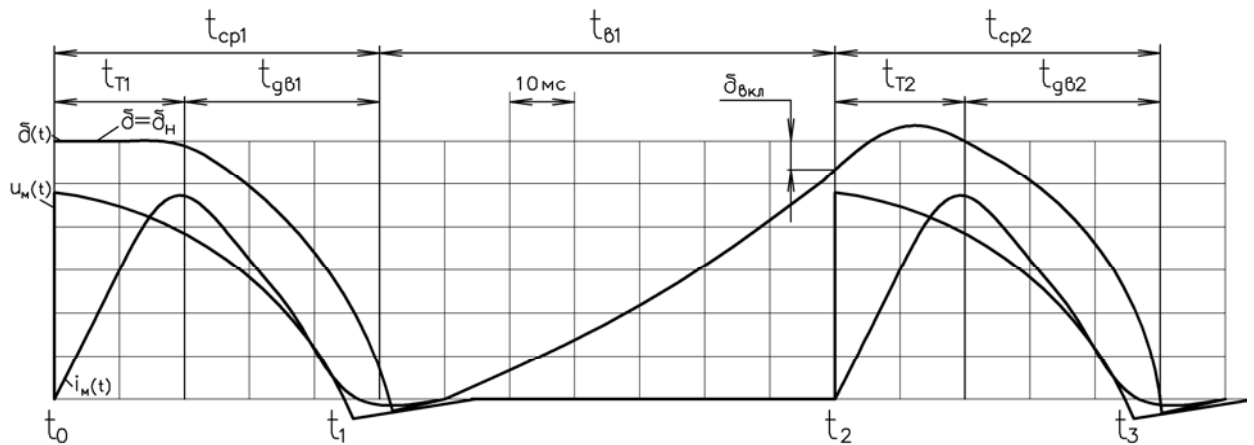


Рис.5.13 – Осциллограмма рабочего процесса частотной машины с ЛЭМД с питанием от секционированного емкостного накопителя.

Несекционированный конденсаторный источник (рис.5.12,б) содержит накопительную емкость C_n и прерыватель постоянного тока на транзисторе VTI , с помощью которого происходит дозированное поступление энергии из накопителя C_n в обмотку LM ЛЭМД.

На рис.5.14 представлены динамические характеристики ЛЭМД при питании по схеме на рис.5.12,б. Начало рабочего цикла на диаграмме соответствует моменту t_0 при переходе транзистора VTI в проводящее состояние. В момент времени t_1 ток в обмотке достигает i_{mp} , под действием электромагнитного поля якорь совершает рабочий ход. В момент времени t_2 подается сигнал на отключение транзистора VTI и якорь возвращается под действием пружины. Используемая для совершения рабочего хода часть энергии емкостного накопителя C_n пополняется от источника питания во время холостого хода $t_{г1}$.

Однако мощность источника питания и зарядного устройства должны быть достаточными для восполнения израсходованной энергии, иначе происходит уменьшение напряжения заряда конденсаторной батареи и к началу следующего рабочего хода импульс напряжения U_2 будет отличаться от первого на ΔU ($U_2 = U - \Delta U_1$), соответственно на k -импульсе – $U_k = U - \Delta U_{k-1}$. Сни-

жение подводимой электрической энергии $W_{эл}$ приводит к уменьшению выходных удельных показателей ЛЭМД-привода [195,207].

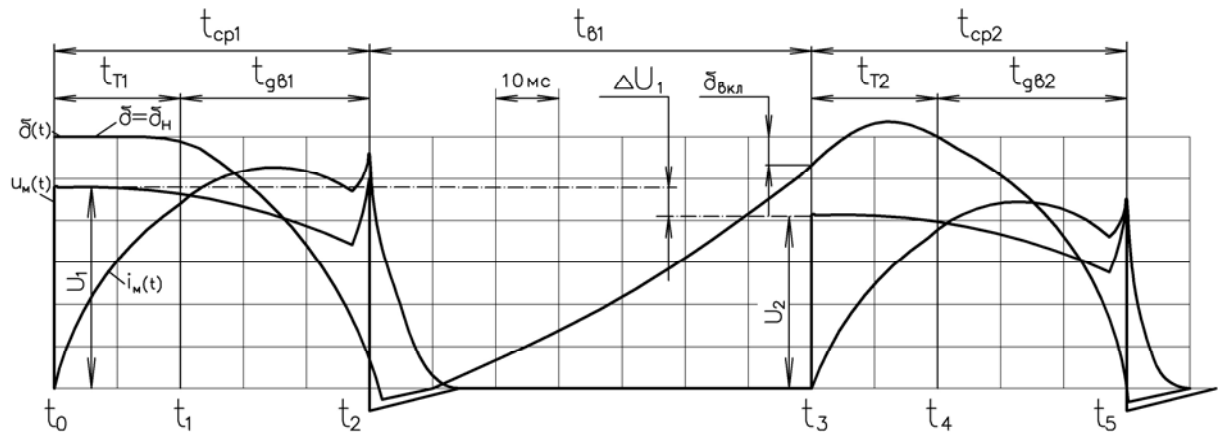


Рис.5.14 – Осциллограмма рабочего процесса частотударной машины с ЛЭМД с питанием от несекционированного емкостного накопителя

Проведенный анализ показывает, что источники с электрическими конденсаторами суммарной емкостью C_H от 0,05 Ф и более, заряжаемые до напряжения ≤ 80 В эффективны для ударных ЛЭМД-приводов с механической энергией 25...50 Дж [83,209].

5.2 Математические модели и характеристики ЛЭМД-привода на основе теории планирования экспериментов

5.2.1 Влияние параметров ударного ЛЭМД-привода на эффективность энергопреобразования

При анализе рассматриваемых многофакторных систем представляется целесообразным воспользоваться и другим распространенным в исследовательской практике методом – методом теории планирования экспериментов [17,111,154]. Формулирование задачи оптимизации для принятых областей варьирования представлено в работах [83,195,230].

В качестве основных параметров здесь приняты значения механической энергии $A_{y\partial}$, КПД, частоты ходов. При этом между ними существует связь:

$$\eta = A_{y\partial} / W_{эл}. \quad (5.25)$$

Выходной параметр исследуемой системы – энергия удара $A_{y\partial}$ – определяется следующим образом:

$$A_{y\partial} = m_{\text{я}} V^2 / 2, \quad (5.26)$$

где $m_{\text{я}}$ – масса якоря; V – предударная скорость якоря.

При питании ударной электромагнитной машины от емкостного накопителя электрической энергии, предударная скорость якоря V в значительной степени будет определяться напряжением заряда U накопителя, емкостью C конденсаторной батареи и жесткостью возвратного элемента z , при условии, что массогабаритные показатели машины во всех экспериментах остаются неизменными ($m_{\text{я}}, r = \text{const}$). Следовательно, независимыми переменными, влияющими на энергию удара $A_{y\partial}$, являются емкость C , напряжение U промежуточного накопителя и жесткость возвратной пружины z .

Запасаемая энергия $W_{\text{эл}}$ емкостного накопителя определяется по выражению:

$$W_{\text{эл}} = CU^2 / 2, \quad (5.27)$$

следовательно, согласно (5.25), КПД определяется, в том числе, параметрами емкостного накопителя энергии: напряжением и емкостью.

Переходные процессы в ЛЭМД $u = f(t)$, $i = f(t)$, $\delta = f(t)$ могут быть описаны дифференциальными уравнениями [149,196], либо получены в процессе экспериментальных исследований. По ним легко судить о значении выходной механической энергии, частоте ударов и КПД ЛЭМД-привода, принимая в качестве независимых факторов параметры конденсаторного накопителя энергии и жесткость возвратного элемента z .

При трех факторах и изменении их по трем уровням необходимо получить уравнения:

$$A_{y\partial} = f(C, U, z); \quad (5.28)$$

$$n = f(C, U, z); \quad (5.29)$$

$$\eta = f(C, U, z). \quad (5.30)$$

Пределы изменения факторов в данной задаче для некоторых частных применений выбраны на основе предварительных расчетов и результатов

экспериментальных исследований и охватывают диапазон значений, представляющих интерес при создании данного класса электромагнитных ударных машин для погружения стержневых элементов в грунт: $C=0,01\dots 0,13$ Ф, $U=50\dots 120$ В, $z=500\dots 1100$ Н/м.

Для определения влияния емкости C и напряжения U конденсаторного накопителя энергии жесткости возвратного элемента z при проведении исследований воспользуемся трехфакторным экспериментом

Для решения задачи необходимо определить регрессионное уравнение (5.28) $A_{y0} = f(C, U, z)$, адекватное результатам экспериментальных исследований. Необходимо составить план эксперимента и определить его основные характеристики – верхний $X_{0i.max}$, нижний $X_{0i.min}$, исходный X_{0i} уровни факторов (5.10), интервал варьирования ΔX_{0i} (5.11) и заменить нормированные значения их соответствующими кодированными величинами – $\bar{X}_{0i}$, $\bar{X}_{i.max}$, $\bar{X}_{i.min}$ (5.12), (5.13), (5.14), которые сведены в табл.5.2.

Табл.5.2 – План многофакторного эксперимента

Характеристика	Емкость, C , Ф	$\bar{X}_1$	Напряжение, U , В	$\bar{X}_2$	Жесткость пружины, z , Н/м	$\bar{X}_3$
Верхний уровень $C_{max}, U_{max}, z_{max}$	0,13	«+1»	120	«+1»	1100	«+1»
Нижний уровень $C_{min}, U_{min}, z_{min}$ $C_{min}, U_{min}, z_{min}$	0,01	«-1»	50	«-1»	500	«-1»
Основной уровень C_0, U_0, z_0	0,07	«0»	85	«0»	800	«0»
Интервал варьирования, $\Delta C, \Delta U, \Delta z$	0,06	–	35	–	300	–

Так как исследуемая зависимость (5.28) не является линейной, представим ее в виде квадратного полинома:

$$Y = A_0 + A_1 \bar{X}_1 + A_2 \bar{X}_2 + A_3 \bar{X}_3 + A_{11} \bar{X}_1^2 + A_{22} \bar{X}_2^2 + A_{33} \bar{X}_3^2 + A_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 + A_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_3 + A_{23} \bar{X}_2 \bar{X}_3, \quad (5.31)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{12}, A_{13}, A_{23}$ – коэффициенты регрессии.

Разработав методику проведения экспериментальных исследований, составим матрицу планирования трехфакторного эксперимента (табл.5.3), проведем анализ случайных погрешностей и оценим точность измерений [154,157].

Разброс полученных экспериментальных значений характеризуется дисперсией σ^2 и показателем вариации K_σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_\sigma)^2}{n-1}}; \quad (5.32)$$

$$K_\sigma = \sigma / \bar{Y}, \quad (5.33)$$

где $\bar{Y}_\sigma$ – среднеарифметическое значение измерений; n – количество параллельных измерений в одной серии экспериментов.

Табл.5.3 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Номер серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	С, Ф	U, В	z, Н/м	y_σ				$y_{расч}$	Δy
							$y_{\sigma 1}$	$y_{\sigma 2}$	$y_{\sigma 3}$	$\bar{y}$		
1	–	–	–	0,01	50	500	6,5	5,7	6,3	6,2	6,67	-0,5
2	+	–	–	0,13	50	500	26	25	26	25,6	26,6	-1
3	–	+	–	0,01	120	500	30	28	28	28,33	28,6	-0,27
4	+	+	–	0,13	120	500	174	170	172	172	168	4
5	–	–	+	0,01	50	1100	20	18	18	18,67	18,3	0,36
6	+	–	+	0,13	50	1100	15	13	13	13,67	13,7	–
7	–	+	+	0,01	120	1100	24	24	25	24,33	24	0,33
8	+	+	+	0,13	120	1100	146	144	148	146	150	-4
9	0	0	0	0,07	85	800	44	46	44	44,7	45,46	0,79
10	+	0	0	0,13	85	800	86	85	84	85	84,67	0,33
11	–	0	0	0,01	85	800	12	13	12	12,3	12,24	0,1
12	0	+	0	0,07	120	800	97	95	95	95,6	95,08	0,58
13	0	–	0	0,07	50	800	16	17	15	16	15,63	0,37
14	0	0	+	0,07	85	1100	42	43	45	43,3	44,06	-0,73
15	0	0	–	0,07	85	500	48	50	50	49,33	51,05	-1,72

Малые показатели коэффициента вариации K_σ (Приложение 8, табл.П8.1) свидетельствуют о достоверности полученных результатов измерений. Для повышения достоверности величины $\bar{Y}$, необходимо определить доверительный интервал μ значений Y_i , в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью:

$$\mu = \pm t\sigma, \quad (5.34)$$

где t – гарантийный коэффициент, который для данных экспериментов не должен превышать 4 [154,157]. При условии $t=3$, определяем доверительный интервал для каждой серии экспериментов. Полученные значения μ сведены в Приложение 8, табл.П8.1.

Так как все данные, полученные экспериментальными исследованиями лежат в пределах допустимых значений доверительных интервалов, определим для регрессионного уравнения (5.31) коэффициенты регрессии по (5.17) – (5.20). Получим:

$$A_{y0}=45,46+35,83 \bar{X}_1+37,8 \bar{X}_2-3,57 \bar{X}_3+32,587 \bar{X}_1 \bar{X}_2-4,88 \bar{X}_1 \bar{X}_3-3,68 \bar{X}_2 \bar{X}_3+0,75 \bar{X}_1^2+6,95 \bar{X}_2^2-0,45 \bar{X}_3^2. \quad (5.35)$$

Сравнение полученных по регрессионному уравнению Y_P (5.35) результатов со значениям экспериментальных исследований $\bar{Y}_Э$ показало, что максимальное расхождение $\Delta Y = \bar{Y}_Э - Y_P$ составляет не более 7 %. Проведем проверку значимости коэффициентов регрессии (5.35). С учетом рекомендаций [154] влияние коэффициентов $A_{11}=0,75$ и $A_{33}=-0,45$ на функцию отклика лежит в пределах погрешности проведения эксперимента. Таким образом, незначимые коэффициенты исключаем из рассмотрения, а уравнение (5.35) после упрощения примет вид:

$$A_{y0}=45,46+35,83 \bar{X}_1+37,8 \bar{X}_2-3,57 \bar{X}_3+32,587 \bar{X}_1 \bar{X}_2-4,88 \bar{X}_1 \bar{X}_3-3,68 \bar{X}_2 \bar{X}_3+6,95 \bar{X}_2^2. \quad (5.36)$$

Значения выходной механической энергии удара A_y , полученные по упрощенному выражению (5.36), удовлетворяют экспериментальным данным с погрешностью менее 9 %.

Оценку соответствия результатов, полученных экспериментальными исследованиями и по регрессионному уравнению (5.36), проведем по критерию Фишера (5.21). Дисперсию адекватности D_a и средних значений D_{cp} определим по (5.22) и (5.23) соответственно.

Расчеты показали, что полученное уравнение (5.36) адекватно характеризует искомую зависимость (5.28).

Коэффициенты регрессии (5.36) указывают степень влияния факторов (C , U , z) на выходную механическую энергию $A_{y\partial}$ и являются количественной оценкой этого влияния.

Анализ коэффициентов регрессии уравнения (5.36) показал, что наибольшее влияние на энергию удара оказывают напряжение заряда и емкость конденсаторного накопителя энергии. Для построения поверхности отклика в факторном пространстве один из факторов будем считать неизменным. При варьируемых значениях емкости $C=var$ и напряжения $U=var$ от «-1» до «+1» при неизменной жесткости возвратного элемента $z=const$, построим соответствующую поверхность (рис.5.15)

$$A_{y\partial}=f(C,U), \text{ при } z=const. \quad (5.37)$$

На рис.5.15 показана пространственная поверхность отклика исследуемой зависимости (5.37), при значении жесткости пружины z на уровне «-1». Из диаграммы следует, что значение энергии удара $A_{y\partial}$ возрастает пропорционально емкости C промежуточного накопителя и квадрату напряжения U его заряда и достигает максимума, когда C и U находятся на уровне «+1» ($C=0,13 \text{ Ф}$, $U=120 \text{ В}$).

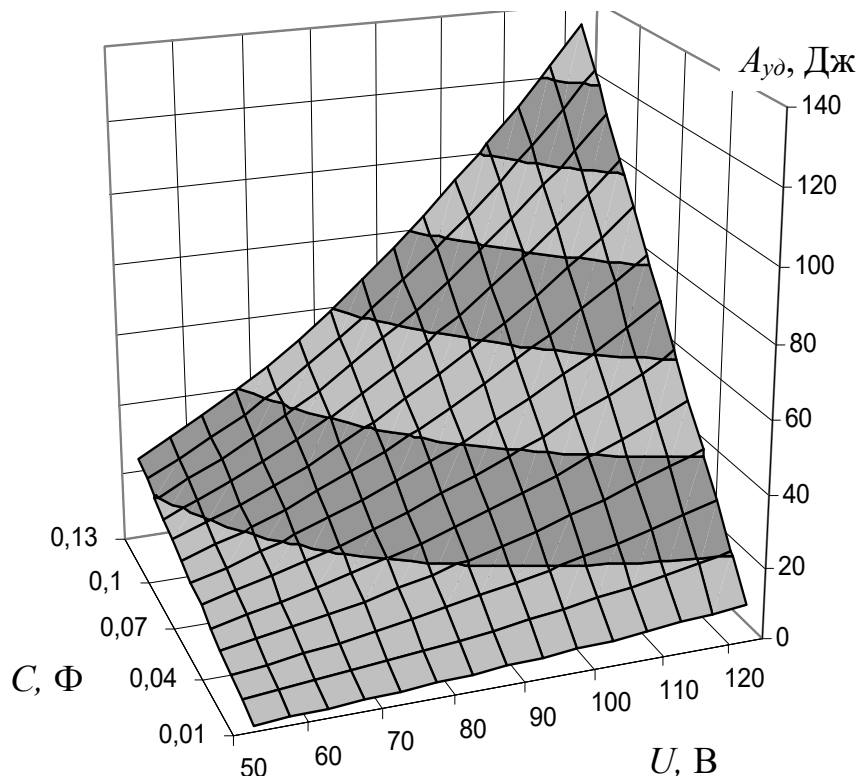


Рис.5.15 – Поверхность отклика $A_{y\partial}=f(U, C)$ при z на уровне «-1».

Вторым по значимости после параметров конденсаторного накопителя фактором влияния в уравнении регрессии (5.36), является жесткость возвратной пружины z . На рис.5.16 представлена поверхность отклика в факторном пространстве $A_y=f(U, z)$, при значении емкости C на уровне «+1».

Наибольшее значение энергии удара $A_{y\partial}$ для рассмотренных поверхностей соответствует $z=800$ Н/м, при значениях остальных факторов на уровне «+1».

Снижение механической энергии удара $A_{y\partial}$ происходит при жесткости возвратного элемента $z<800$ Н/м, либо $z>800$ Н/м. При значениях $z>800$ Н/м уменьшение значений $A_{y\partial}$ объясняется большими энергозатратами на деформацию пружины во время рабочего хода. Выбор возвратной пружины с жесткостью $z<800$ Н/м также приведет к снижению $A_{y\partial}$ за счет уменьшения накопленного запаса энергии в магнитной системе ЛЭМД к началу рабочего хода [195,218].

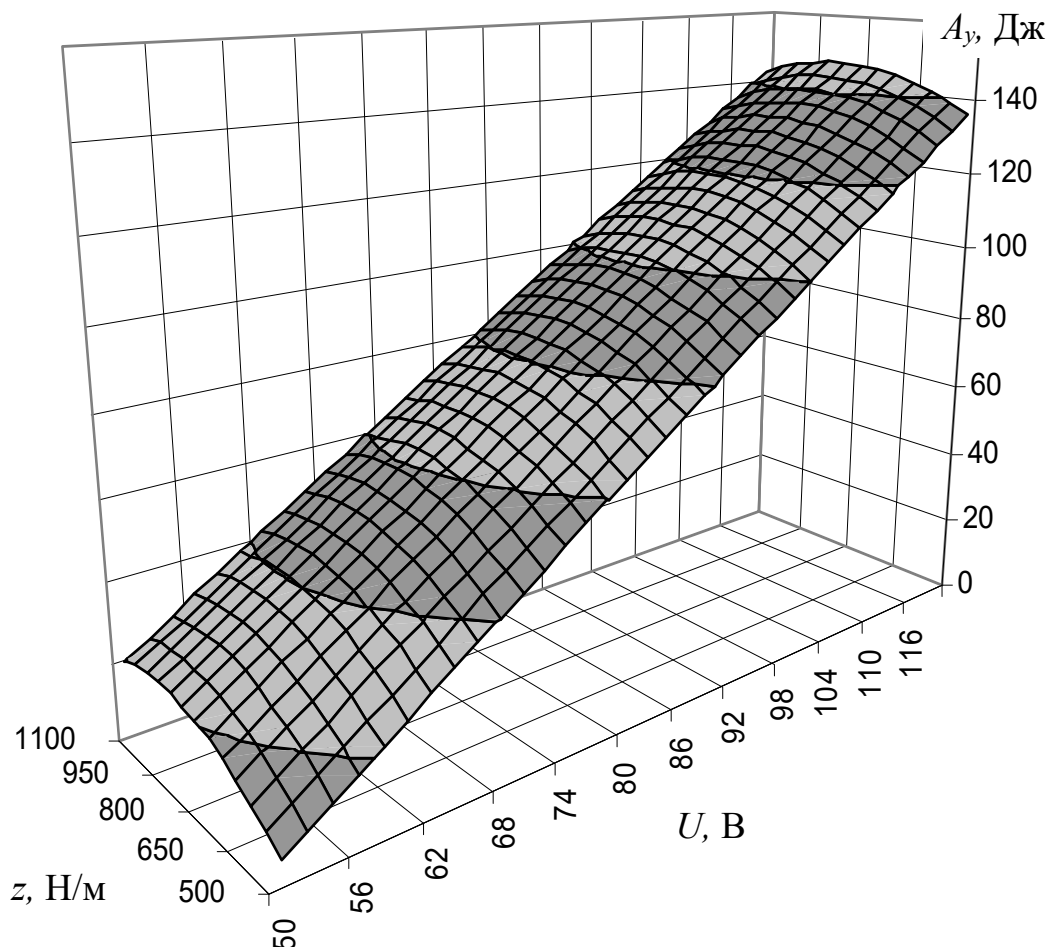


Рис.5.16 – Поверхность отклика $A_y=f(U, z)$ при C на уровне «+1» ($C=0,13$ Ф).

Аналитическое исследование уравнения (5.36) на экстремум [154], показывает, что в выбранной области варьирования факторов экстремума нет. Поэтому предпочтительный режим работы УМ, обеспечивающий наибольшее значение энергии удара $A_{уд}$, можно определить лишь по значениям коэффициентов в аппроксимирующем полиноме (5.36).

Для определения влияния параметров емкостного накопителя и жесткости возвратного элемента на частоту ударов после построения плана эксперимента (табл.5.2), составления матрицы планирования (табл.5.4), оценки точности и надежности измерений по (5.32) – (5.34) (Приложение 8, табл.П8.2), находим коэффициенты регрессионного уравнения по (5.17) – (5.20) и, подставляя их в аппроксимирующее выражение (5.29), с учетом проверки их значимости получим:

$$n=304+78\bar{X}_1+45\bar{X}_2+201\bar{X}_3+18,75\bar{X}_1\bar{X}_3+ \\ +18,75\bar{X}_2\bar{X}_3+70\bar{X}_1^2-5\bar{X}_2^2-5\bar{X}_3^2. \quad (5.38)$$

Табл.5.4 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	С, Ф	U, В	z, Н/м	y_3				$y_{расч}$	Δy
							y_{31}	y_{32}	y_{33}	$\bar{y}$		
1	–	–	–	0,01	50	500	47	45	45	45,67	46	-0,33
2	+	–	–	0,13	50	500	190	186	197	191	192	-1
3	–	+	–	0,01	120	500	88	93	90	90,33	91	-0,67
4	+	+	–	0,13	120	500	255	248	250	251	252	-1
5	–	–	+	0,01	50	1100	400	394	396	396,67	396	0,67
6	+	–	+	0,13	50	1100	590	600	598	601	594	7
7	–	+	+	0,01	120	1100	514	512	520	515,33	516	-0,67
8	+	+	+	0,13	120	1100	730	733	728	730,33	729	1,33
9	0	0	0	0,07	85	800	300	306	305	303,67	304	-0,33
10	+	0	0	0,13	85	800	447	450	455	450,67	452	-1,33
11	–	0	0	0,01	85	800	301	292	294	295,67	296	-0,33
12	0	+	0	0,07	120	800	342	344	349	345	344	1
13	0	–	0	0,07	50	800	252	256	256	254,67	254	0,67
14	0	0	+	0,07	85	1100	500	502	496	499,33	500	-0,6
15	0	0	–	0,07	85	500	93	92	100	95	98	-3

Значительным влиянием на частоту ударов n оказывают емкость C накопителя энергии с коэффициентом регрессии «+78» и напряжение его заряда U с коэффициентом «+45». Знак плюс свидетельствует о том, что с увеличением значений факторов величина параметра растет.

На рис.5.17 представлена поверхность отклика $n=f(C,U)$ при z на уровне «+1». Наибольшая частота ходов n якоря достигается, когда напряжение U и емкость C промежуточного накопителя энергии находятся на уровне «+1» ($C=0,13$ Ф; $U=120$ В), так как уменьшается время рабочего хода.

По регрессионному уравнению (5.38) видно, что на частоту ударов n влияет жесткость возвратного элемента z . На рис.5.17 построены диаграммы изменения частоты ударов n электромагнитной машины от величины жесткости пружины z при различных уровнях остальных факторов (C, U).

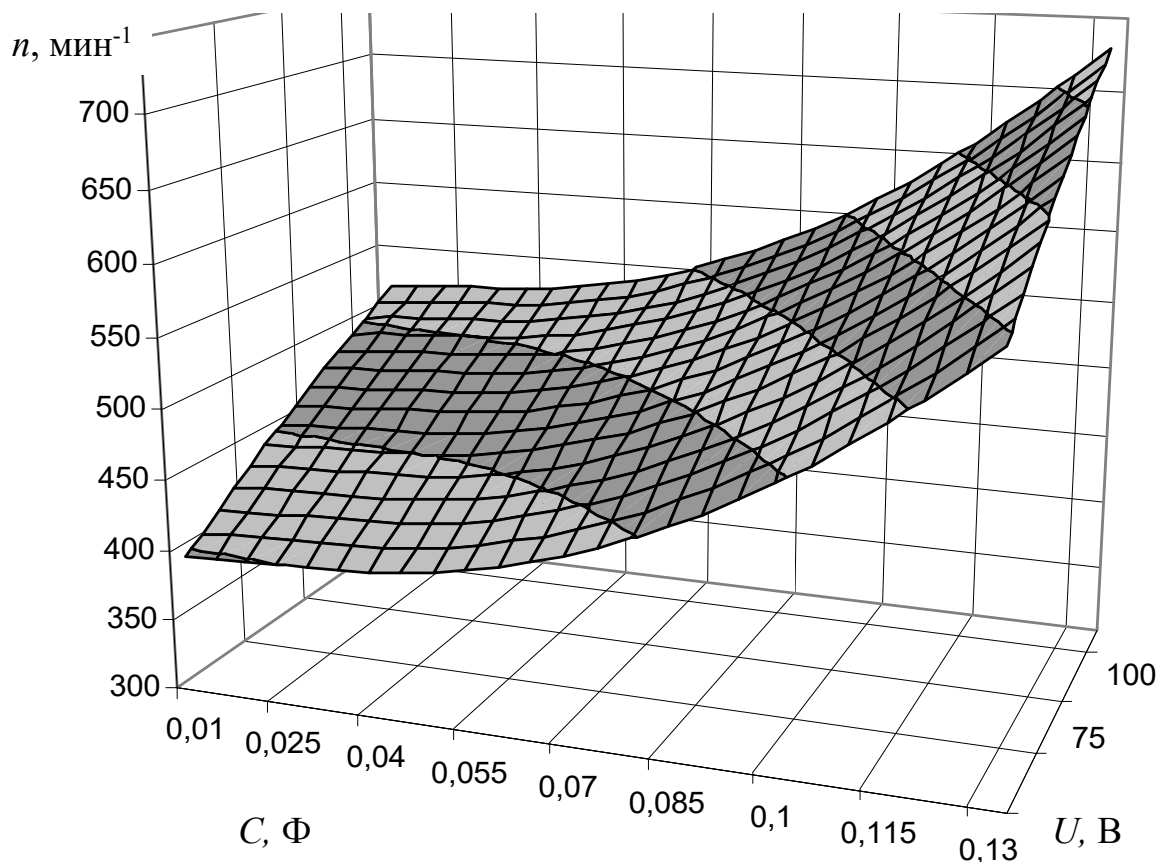


Рис.5.17 – Поверхность отклика $n=f(C, U)$ при z на уровне «+1» ($z=1100$ Н/м).

Оценим влияние жесткости пружины z на частоту ударов n на уровнях «–1», «0», «+1» (рис.5.18). Частота ударов n электромагнитной машины пропорциональна $1/t_u$, где t_u – время одного цикла УМ, которое определяется как

$$t_u = t_{cp} + t_в, \quad (5.39)$$

где t_{cp} – время срабатывания якоря ЛЭМД (рабочий ход); $t_в$ – время возврата якоря ЛЭМД (холостой ход).

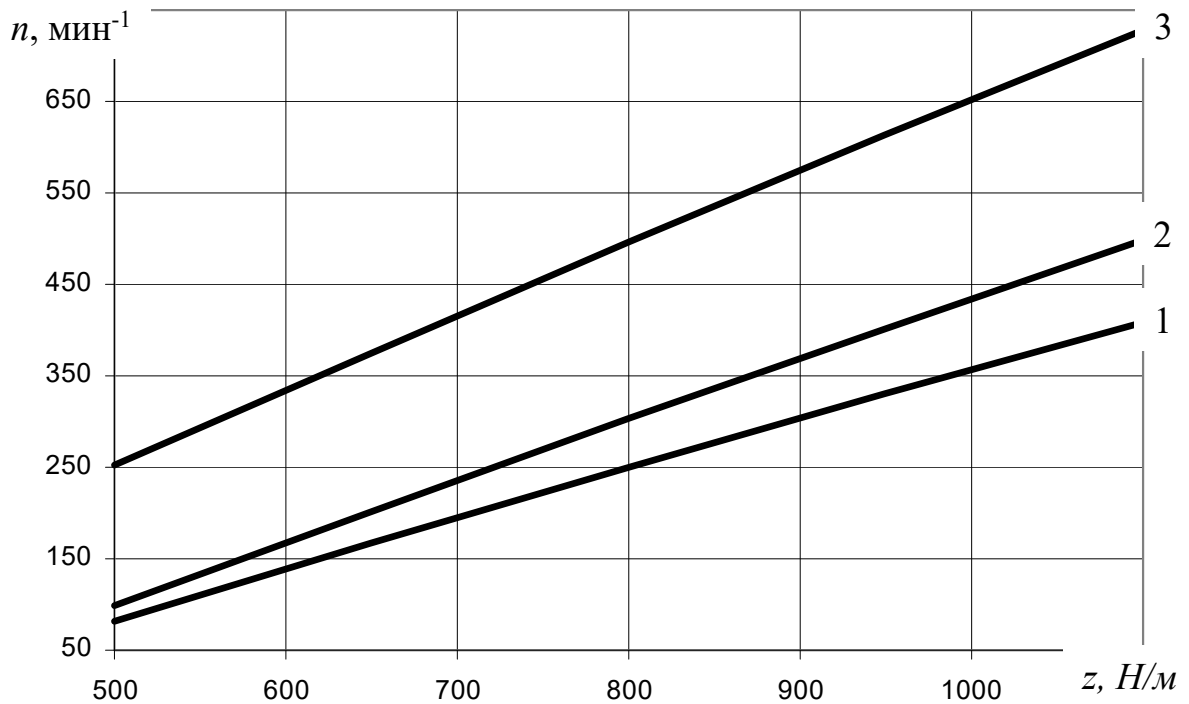


Рис.5.18 – Диаграммы изменения частоты ударов n электромагнитной машины от величины жесткости пружины z при:
1 – C, U на уровне «-1»; 2 – C, U на уровне «0»; 3 – C, U на уровне «+1».

Очевидно, чем короче время рабочего и холостого ходов якоря в течение цикла, тем выше значение $1/(t_{cp}+t_{\theta})$ и, следовательно, частоты ударов n .

При жесткости z на уровне «-1» ($z=500 \text{ Н/м}$) в пружине во время рабочего хода аккумулируется минимальный запас энергии, интервал времени возврата t_{θ} при этом растягивается и может в 5...7 раз превышать продолжительность срабатывания t_{cp} [213]. В результате, электромагнитная машина, оснащенная такой пружинной, обеспечивает слишком малую ($90...120 \text{ мин}^{-1}$) частоту ходов якоря.

Пружина жесткостью z на уровне «+1» ($z=1100 \text{ Н/м}$) оказывает на рабочем ходе слишком сильное противодействие перемещаемому полю якорю. Значительная энергия, запасенная в сжатой на рабочем ходе пружине, обеспечивает последующий быстрый и энергичный возврат якоря за время $t_{\theta} < t_{cp}$.

Вследствие этого ЛЭМД, оснащенный жесткой пружинной обладает значительным быстродействием и обеспечивает частоту ходов якоря $n \geq 700 \text{ мин}^{-1}$. При этом на обратном ходе, скорость V_o якоря близка к его предупредной скорости V_y , то есть $V_y \approx V_o$, что сопровождается соударения якоря с резиновым буфером

и корпусными деталями ЛЭМД. Эффект соударения, в свою очередь, вызывает появление усилий отдачи и низкочастотную вибрацию машины с амплитудой 7...10 мм, что отрицательно влияет на работающих и потому нежелательно.

Пружина с жесткостью z на уровне «0» ($z=800$ Н/м) не оказывает чрезмерного тормозящего противодействия совершающему рабочий ход якорю, но при этом аккумулирует столько энергии, что обеспечивается быстрый, но с минимальной скоростью соударения возврат якоря и хорошее ($n=300...420$ мин⁻¹) быстродействие ЛЭМД. Она обеспечивает соотношение между интервалами срабатывания и холостого хода в цикле, близкое к единице, то есть $t_0/t_{cp} \leq 1,3$.

Для определения экстремума после дифференцирования уравнения (5.38) по переменным $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ и $\bar{X}_3$ [154], находим, что данное аппроксимирующее выражение в пределах варьирования факторов экстремума не имеет. Таким образом, наилучший режим работы ударной машины, обеспечивающий наибольшее значение частоты ударов, можно определить лишь по значениям коэффициентов в регрессионном полиноме (5.38).

Табл.5.5 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	C, Ф	U, В	z, Н/м	y _э				У _{расч}	Δy
							y _{э1}	y _{э2}	y _{э3}	$\bar{y}$		
1	–	–	–	0,01	50	500	19	20	19	19,33	20,656	-1,32
2	+	–	–	0,13	50	500	11	13	13	12,33	12,857	-0,52
3	–	+	–	0,01	120	500	16	15	16	15,67	14,657	1
4	+	+	–	0,13	120	500	8	7	7	7,3	6,857	0,48
5	–	–	+	0,01	50	1100	4	4	5	4,33	5,257	-0,92
6	+	–	+	0,13	50	1100	12	11	11	11,3	11,46	-0,12
7	–	+	+	0,01	120	1100	12	12	11	11,67	11,257	0,41
8	+	+	+	0,13	120	1100	18	16,5	17	17,17	17,46	-0,3
9	0	0	0	0,07	85	800	27	27	26	26,67	26,88	0,21
10	+	0	0	0,13	85	800	20	19	21	20	19,38	0,62
11	–	0	0	0,01	85	800	20	19	20	19,67	20,18	-0,51
12	0	+	0	0,07	120	800	24	24	23	23,67	23,78	-0,11
13	0	–	0	0,07	50	800	22	22	23	22,33	23,4	-0,7
14	0	0	+	0,07	85	1100	20	21	20	20,33	21,58	-1,25
15	0	0	–	0,07	85	500	26	25	25	25,3	24	1,3

Для получения аналитической зависимости коэффициента полезного действия η от влияющих на него факторов (C, U, z) построим матрицу плани-

рования трехфакторного эксперимента (табл.5.5), оценим точность и надежность измерений (Приложение 8, табл.П8.3).

По рекомендациям, изложенным в п.п. 5.1.1 и в [154] определим зависимость (5.30): $\eta=f(C, U, z,)$. После расчетов и несложных преобразований получим регрессионное уравнение:

$$\eta=25,6-0,4 \bar{X}_1-1,2 \bar{X}_3+3,5 \bar{X}_1 \bar{X}_3+3 \bar{X}_2 \bar{X}_3-7 \bar{X}_1^2-3 \bar{X}_2^2-4 \bar{X}_3^2. \quad (5.40)$$

По регрессионному уравнению (5.40) проведем анализ влияния емкости C и напряжения заряда U конденсаторного накопителя на КПД при условии $z=const$ (z на уровне «0»). Поверхность отклика $\eta=f(C, U)$ при z на уровне «0» представлена на рис.5.19.

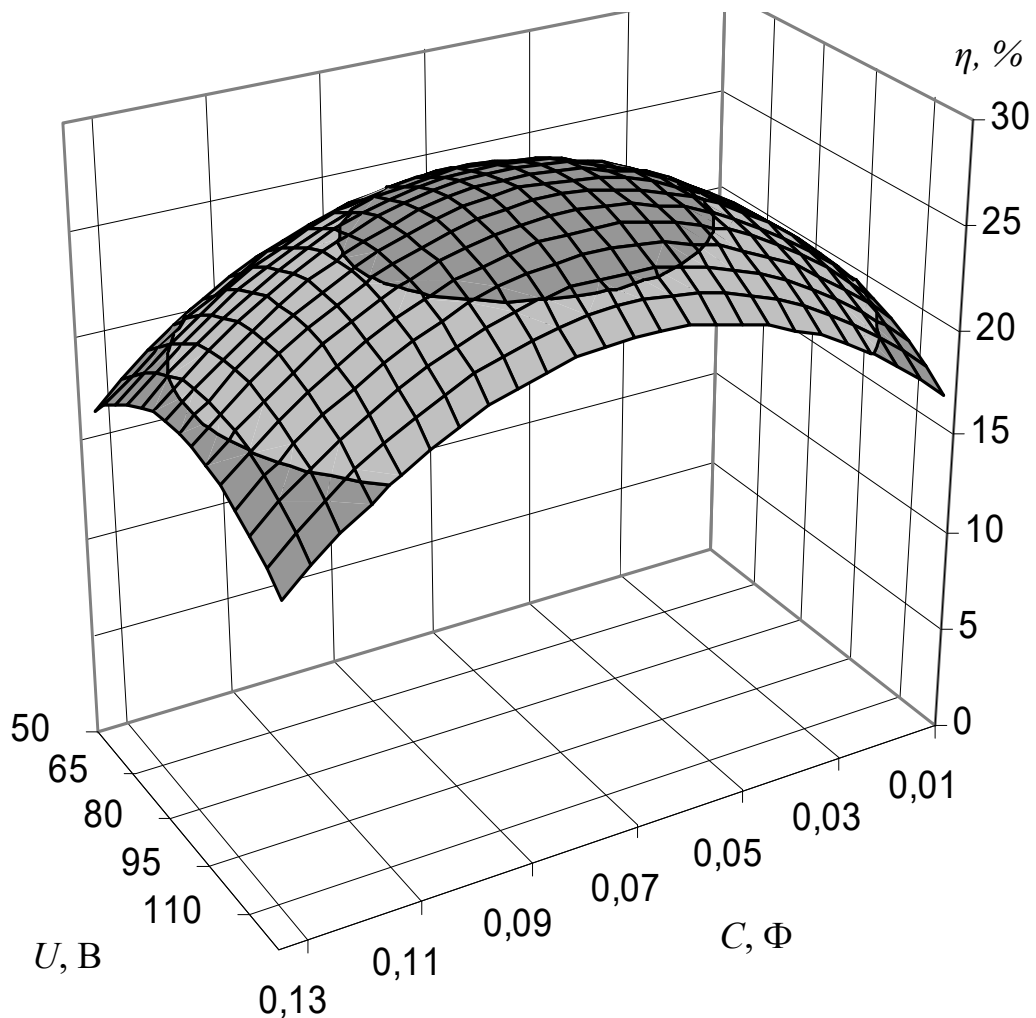


Рис.5.19 – Поверхность отклика $\eta=f(C, U)$ при z на уровне «0» ($z=800$ Н/м).

Анализ поверхности отклика (рис.5.19) показал, что наибольшее значение η достигается, когда C и U находятся на уровне «0». При увеличении

напряжения U на интервале от «0» до «+1» (при $C=const$) КПД уменьшается. Это объясняется тем, что разряд конденсаторного накопителя на обмотку напряжением «+1» создает повышенные скорости нарастания тока $\frac{di}{dt}$ и магнитного потока $\frac{d\psi}{dt}$ в момент трогания якоря. При этом, чем быстрее здесь возрастают эти величины, тем больше наведенные в стали вихревые токи и меньше суммарное потокоцепление, что приводит к дополнительным потерям.

Увеличение емкости C промежуточного накопителя энергии в интервале варьирования от «0» до «+1» обеспечивает плавность разрядного процесса, однако избыточная длительность разрядного импульса приведет к «залипанию» якоря и, соответственно, к увеличению потерь и уменьшению КПД величины жесткости пружины z , при C, U на уровне «0» [195,208].

Выбор накопителя энергии с емкостью C и напряжением U на уровне «-1» ($C=0,01$ Ф; $U=50$ В) также снижает η , что объясняется уменьшением энергии удара $A_{y\partial}$ за счет больших потерь при сжатии пружины.

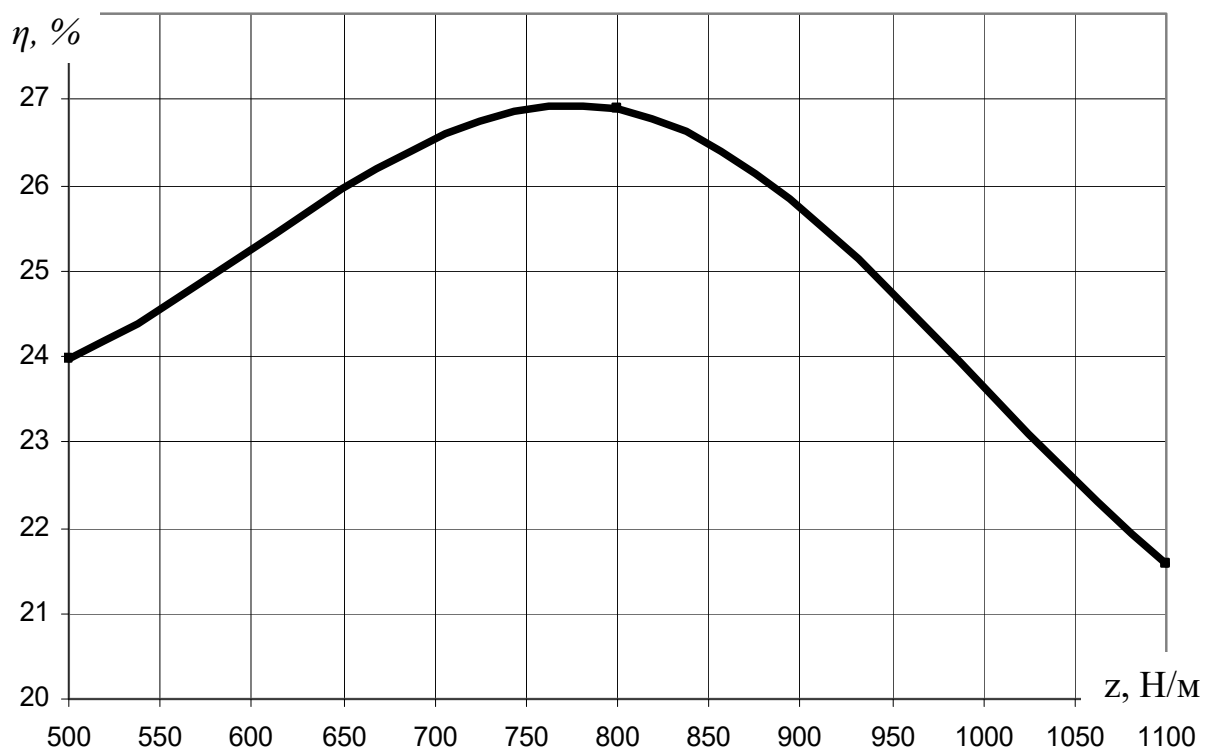


Рис.5.20 – Диаграмма изменения КПД ЛЭМД от величины жесткости пружины z , при C, U на уровне «0».

На рис.5.20 представлена диаграмма изменения КПД в зависимости от величины жесткости пружины z , при C и U на уровне «0». Снижение η ударной машины при варьировании жесткости возвратного элемента z на интервале от «0» до «-1» происходит вследствие потерь при «залипании» якоря, так как в момент удара якоря остаточная электромагнитная сила больше противодействующей силы возвратной пружины.

Увеличение жесткости возвратного элемента z на интервале от «0» до «+1» приводит к снижению КПД из-за больших энергозатрат на преодоление якорем сил упругости пружины [208].

Таким образом, в результате анализа коэффициентов влияния факторов на энергию удара получен локальный экстремум для показателя A_y , определяемый значениями $C=0,04\dots0,06$ Ф, $U=60\dots80$ В, $z=700\dots900$ Н/м.

Для перевода полученных зависимостей в натуральные единицы необходимо воспользоваться выражением (5.9), тогда

$$A_y = 4,4 + 722,3C + 0,01U + 15,5CU - 0,089z; \quad (5.41)$$

$$n = 466,7C - 0,13U + 0,447z + 1,04Cz + 19444C^2 - 2879,5; \quad (5.42)$$

$$\eta = 3,94 + 123,4C + 0,028z + 0,19U + 0,2Cz - 2,9 \cdot 10^{-4}Uz - 1944,4C^2 - 0,0024U^2 - 4,4 \cdot 10^{-5}z^2. \quad (5.43)$$

Зависимости (5.41) – (5.43) представляют собой приближенную математическую модель электромагнитной ударной машины для погружения стержневых элементов в грунт, которая может быть рекомендована для проведения оперативного анализа при расчете и проектировании подобных устройств.

Применение статистического аппарата теории планирования многофакторного эксперимента позволяет определить не только аналитические зависимости параметров УМ (энергии и частоты ударов, КПД), но и значительно сократить количество опытов, что является важным при проведении экспериментальных исследований на реальном объекте [195].

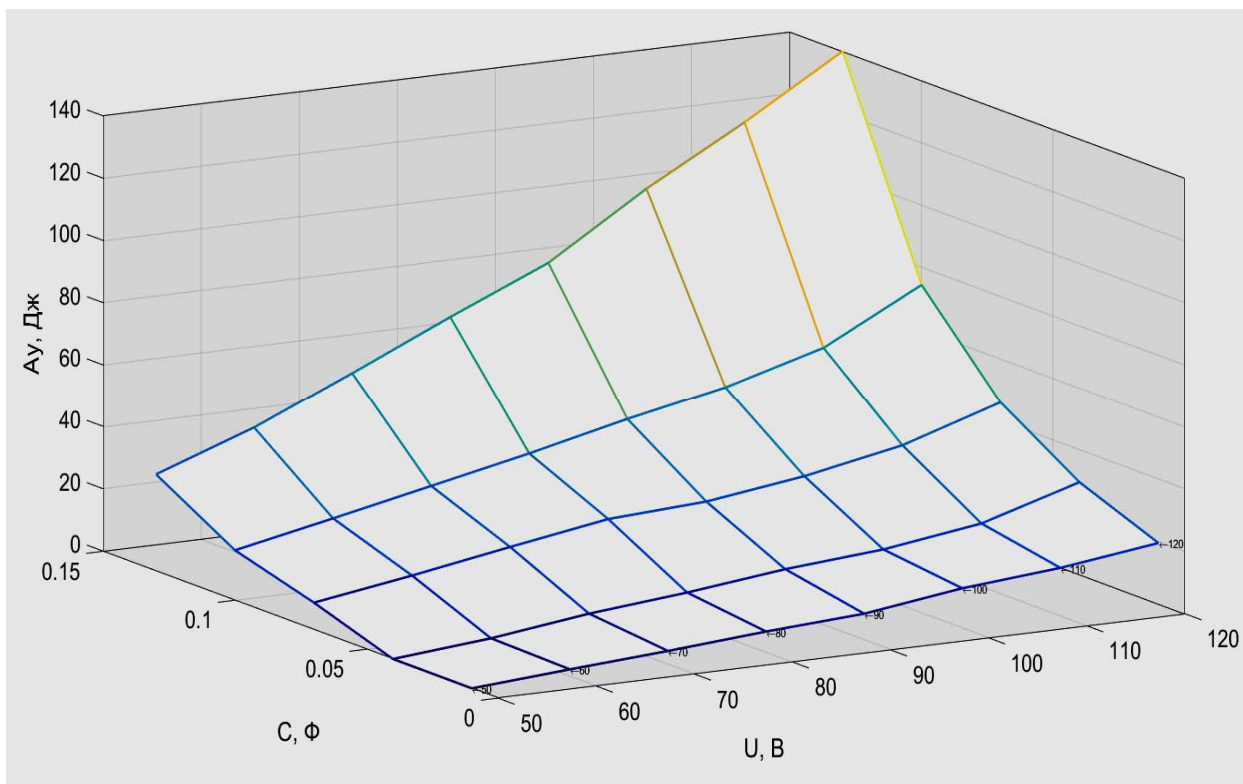


Рис.5.21 – Диаграмма $A_{y0}=f(U, C)$ при z на уровне «-1».

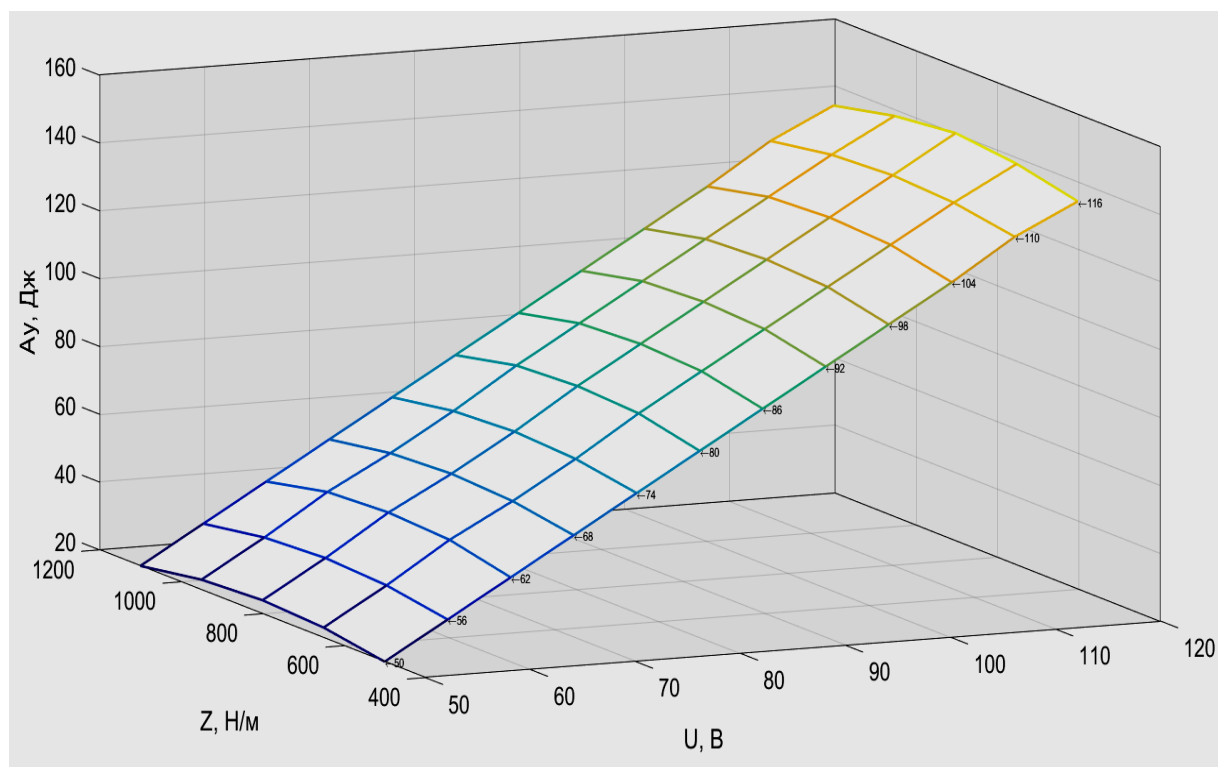


Рис.5.22 – Диаграмма $A_y=f(U, z)$ при C на уровне «+1» ($C=0,13$ Ф).

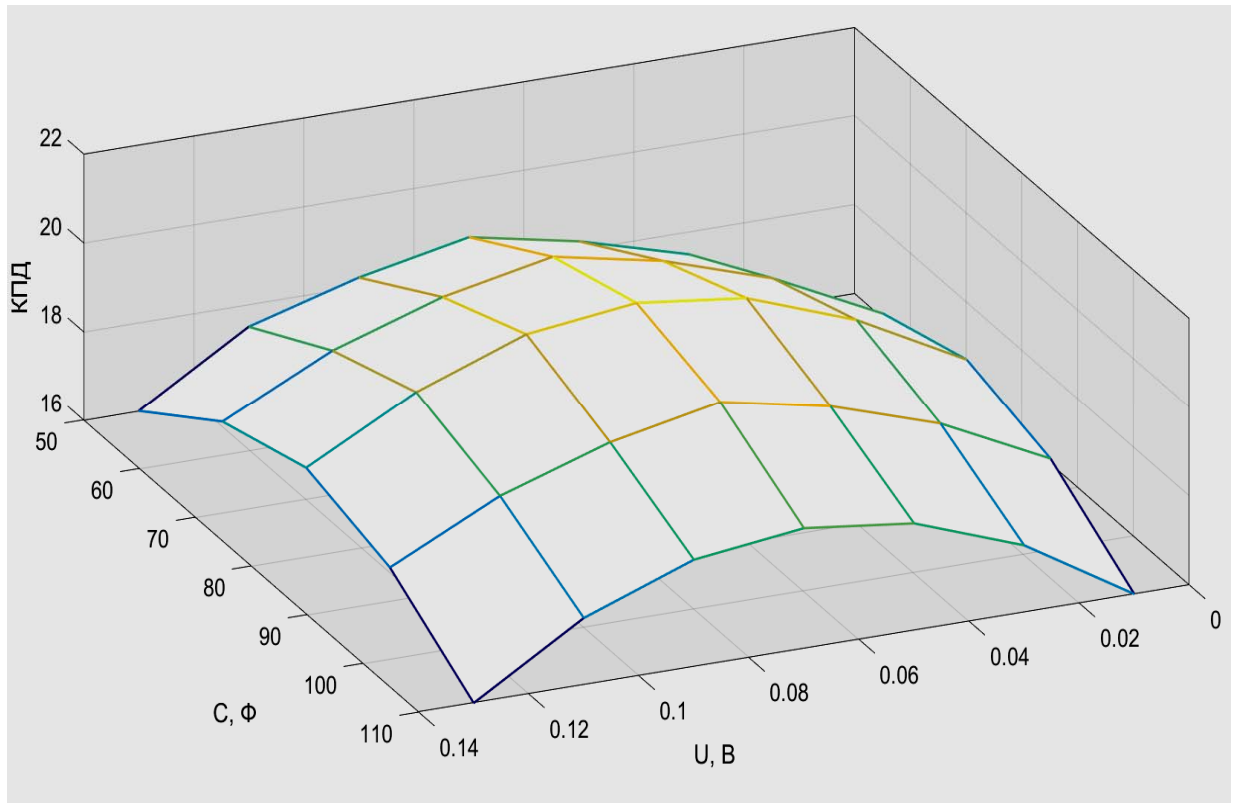


Рис.5.23 – Диаграмма $\eta=f(C, U)$ при z на уровне «0» ($z=800$ Н/м).

В заключении на рис.5.21 – рис.5.23 приведены результаты имитационного моделирования (рис.2.7) в виде диаграмм для зависимостей (5.41), (5.43). Сравнение с поверхностями отклика (рис.5.15, рис.5.16 и рис.5.19) показывает приемлемую сходимость теоретических и экспериментальных результатов исследований, погрешность между которыми составляет не более 17 %. Это связано с упрощением математической модели, при котором не учитываются потери в стали и изменение активного сопротивления обмотки при ее нагреве, а также магнитные свойства и характеристики рабочего органа, находящегося в осевом канале ЛЭМД.

5.2.2 Влияние параметров безударного привода на эффективность энергопреобразования ЛЭМД

Обобщим результаты анализа динамических характеристик дискретного ЛЭМД-привода, например, для перемещения рабочего органа шайбового транспортера [184], на основе теории планирования эксперимента [154].

ЛЭМД-привод транспортера, например, шайбового, для раздачи корма является многофакторной системой, оцениваемой следующими параметрами: тяговым усилием F_m , частотой ходов якоря n , коэффициентом полезного действия η .

$$A = F_m \cdot \delta, \quad (5.44)$$

$$\eta = A / W_{эл}, \quad (5.45)$$

где A – работа на перемещение механической части ЛЭМД; δ – перемещение исполнительного органа за один ход якоря, м.

Если электрический преобразователь оснащен конденсаторным накопителем значение F_m определяется напряжением накопителя, значением емкости, относительным размером сквозного осевого канала. При этом предполагается, что значение величины перемещения δ якоря ЛЭМД неизменно. Переходные характеристики $u = f(t)$, $i = f(t)$, $\delta = f(t)$ получаются из решения дифференциальных уравнений или экспериментов. Тогда можно оценить величину усилия F_m , частоту срабатываний и КПД ЛЭМД-привода, выбрав независимыми переменными показатели C , U , r' . Тогда имеем:

$$F_T = f(C, U, r'); \quad (5.46)$$

$$n = f(C, U, r'); \quad (5.47)$$

$$\eta = f(C, U, r'). \quad (5.48)$$

Пределы изменения факторов в задаче выбраны по результатам моделирования и проведенных экспериментальных исследований [123,124,126] физических образцов, представляющих интерес для ЛЭМД-привода, например, шайбового транспортера: $C = 2,75 \cdot 10^{-3} \dots 12,75 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U = 90 \dots 240$ В, $r' = 0,1 \dots 0,7 r_1$ (r_1 – базисный размер втяжной части якоря).

Для определения влияния параметров емкостного накопителя (емкости C и напряжения U) и r' воспользуемся результатами трехфакторного эксперимента.

Решение интерполяционной задачи состоит в построении регрессионного уравнения $F_T = f(C, U, r')$, адекватного результатам опытов. План экспе-

римента и его основные характеристики – верхний $X_{i.max}$, нижний $X_{i.min}$ и исходный X_{0i} уровни факторов (5.10), интервал варьирования ΔX_{0i} (5.11) и их соответствующие кодированные величины – $\bar{X}_{0i}$, $\bar{X}_{i.max}$, $\bar{X}_{i.min}$ (5.12) – (5.14), сведены в табл.5.6 [154].

Табл.5.6 – План трехфакторного эксперимента

Характеристика	Емкость? $C, 10^{-3} \Phi$	$\bar{X}_1$	Напряже- ние, $U, В$	$\bar{X}_2$	Относительная величина кана- ла r'	$\bar{X}_3$
Верхний уровень $C_{max}, U_{max}, r'_{max}$	$12,75 \cdot 10^{-3}$	«+1»	240	«+1»	0,7	«+1»
Нижний уровень $C_{min}, U_{min}, r'_{min}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	«-1»	90	«-1»	0,1	«-1»
Интервал варьирова- ния, $\Delta C, \Delta U, \Delta r'$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	–	75	–	0,3	–
Основной уровень C_0, U_0, r'_0	$7,5 \cdot 10^{-3}$	«0»	165	«0»	0,4	«0»

Составим матрицу планирования трехфакторного эксперимента (табл.5.7). При оценке точности и надежности измерений воспользуемся положениями теории случайных ошибок [157]. Результаты анализа случайных погрешностей в ходе экспериментов приведены в Приложении 8, табл.П8.4.

Табл.5.7 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Но- мер серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	$C,$ $10^{-3}\Phi$	$U, В$	r'	y_3				$y_{расч}$	Δy
							y_{31}	y_{32}	y_{33}	$\bar{y}$		
1	–	–	–	2,75	90	0,1	75	78	80	77,6	74,8	2,9
2	+	–	–	12,75	90	0,1	400	412	405	405,6	403,4	2,3
3	–	+	–	2,75	240	0,1	500	489	488	492,3	496	3,6
4	+	+	–	12,75	240	0,1	1600	1590	1610	1600	1615	15
5	–	–	+	2,75	90	0,7	60	61	62	61	62,5	1,5
6	+	–	+	12,75	90	0,7	220	223	220	221	227	6
7	–	+	+	2,75	240	0,7	340	340	346	342	345	3
8	+	+	+	12,75	240	0,7	1000	1020	1015	1011	1023	11,3
9	0	0	0	7,5	165	0,4	610	615	615	613,3	621	7,6
10	+	0	0	12,75	165	0,4	1200	1205	1198	1201	1223	22,5
11	–	0	0	2,75	165	0,4	300	310	305	305	302,8	2,2
12	0	+	0	7,5	240	0,4	1150	1155	1148	1151	1156	5,8
13	0	–	0	7,5	90	0,4	290	296	296	294	298,4	4,4
14	0	0	+	7,5	165	0,7	330	330	332	330,6	331,6	0,93
15	0	0	–	7,5	165	0,1	450	445	448	447,6	452,1	4,4

Рассчитав коэффициенты, представим уравнение регрессии функции (5.47):

$$F_m = 621 + 212 \bar{X}_1 + 354 \bar{X}_2 - 185 \bar{X}_3 + 80 \bar{X}_1 \bar{X}_2 - 20 \bar{X}_1^2 + \\ + 195 \bar{X}_2^2 - 251 \bar{X}_3^2 + 75,6 \bar{X}_3^2 \bar{X}_1^2 - 70,6 \bar{X}_2 \bar{X}_3. \quad (5.49)$$

Коэффициенты в (5.49), определенные экспериментом, показывают влияние значений C, U, r' на тяговое усилие F_m .

Наибольшее влияние на значение F_m обеспечивают показатели конденсаторного накопителя у значений емкости C и напряжения заряда U от «-1» до «+1» при $r' = const$:

$$F_m = f(C, U), \text{ при } r' = const. \quad (5.50)$$

На рис.5.24 представлена поверхность исследуемой зависимости (5.47) в факторном пространстве при значении r' на уровне «0».

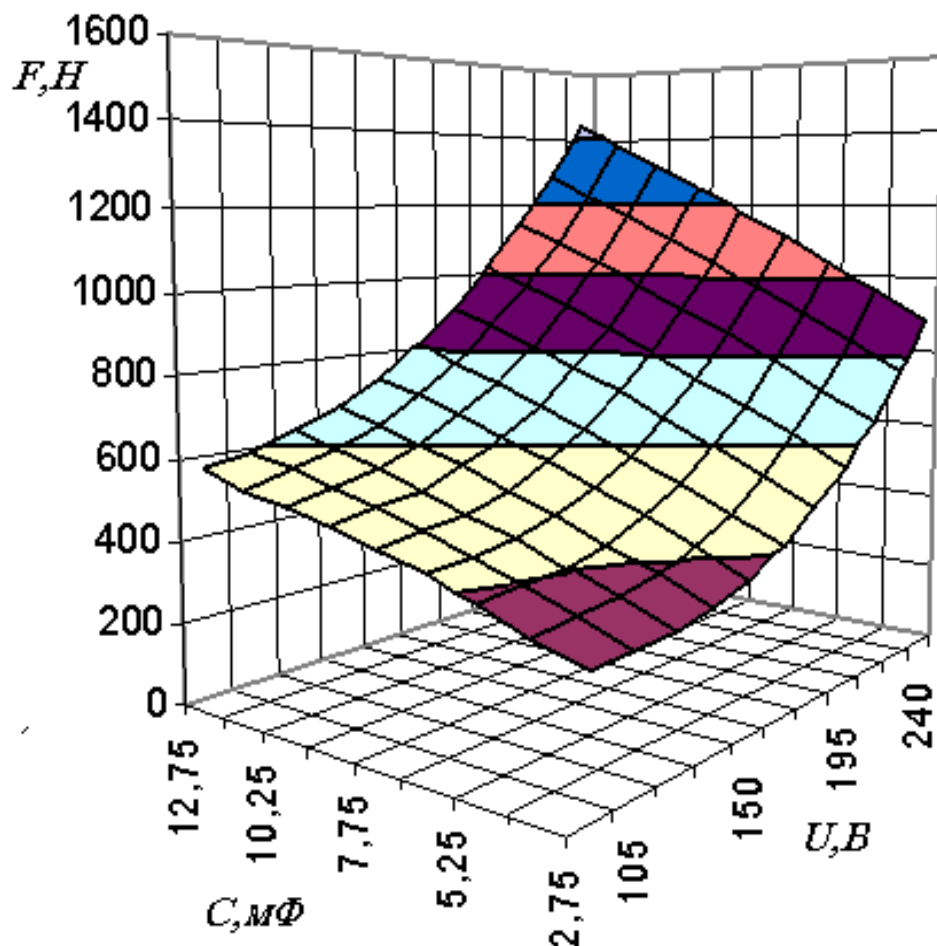


Рис.5.24 – Поверхность отклика $F_m = f(U, C)$ при r' на уровне «0».

Анализ поверхности отклика (рис.5.24) показывает, что величина F_m пропорциональна значению емкости C конденсаторного накопителя энергии

и значению напряжения U на его обкладках. Максимальное значение соответствует кодированному уровню «+1» ($C=12,75 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U=240$ В) [126,208].

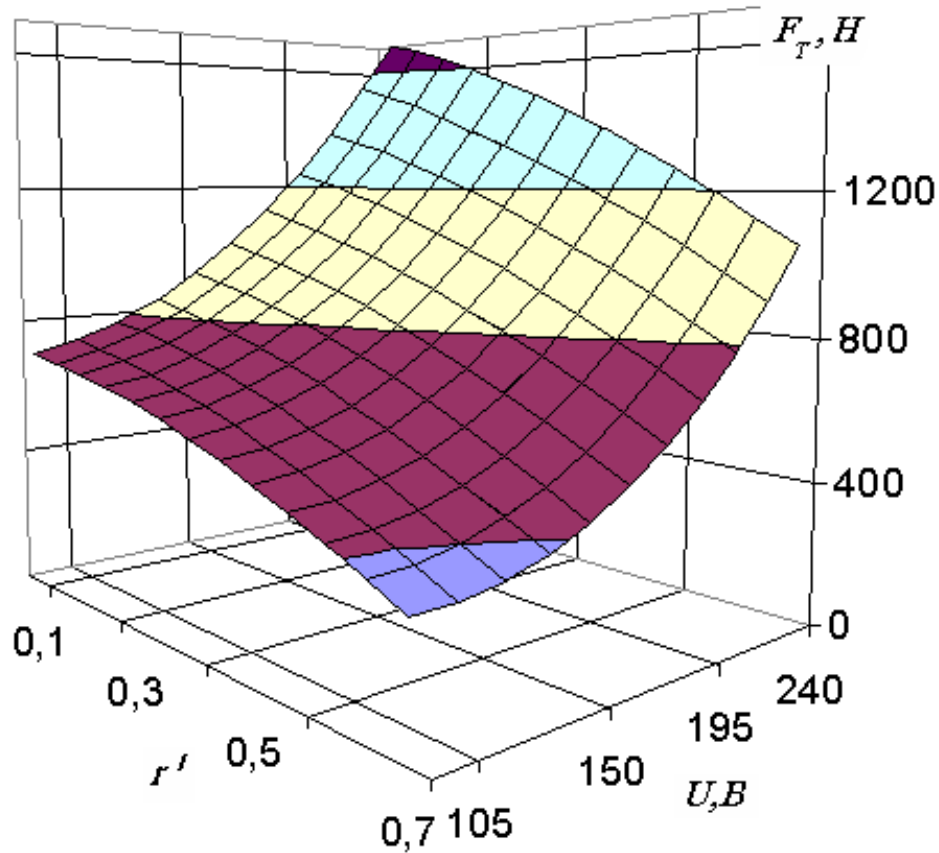


Рис.5.25 – Поверхность отклика $F_m = f(U, r')$ при C на уровне «+1».

Вторым по значимости коэффициента влияния фактором в (5.50), выступает значение относительного размера осевого канала r' . Поверхность отклика (рис.5.25) поясняет влияние показателей U, r' на величину тягового усилия $F_m = f(U, r')$ при $C = const$ (уровне «+1»). Как следует из диаграммы, наибольшее значение F_m достигается при $r' = 0,3$, U и C на уровне «+1».

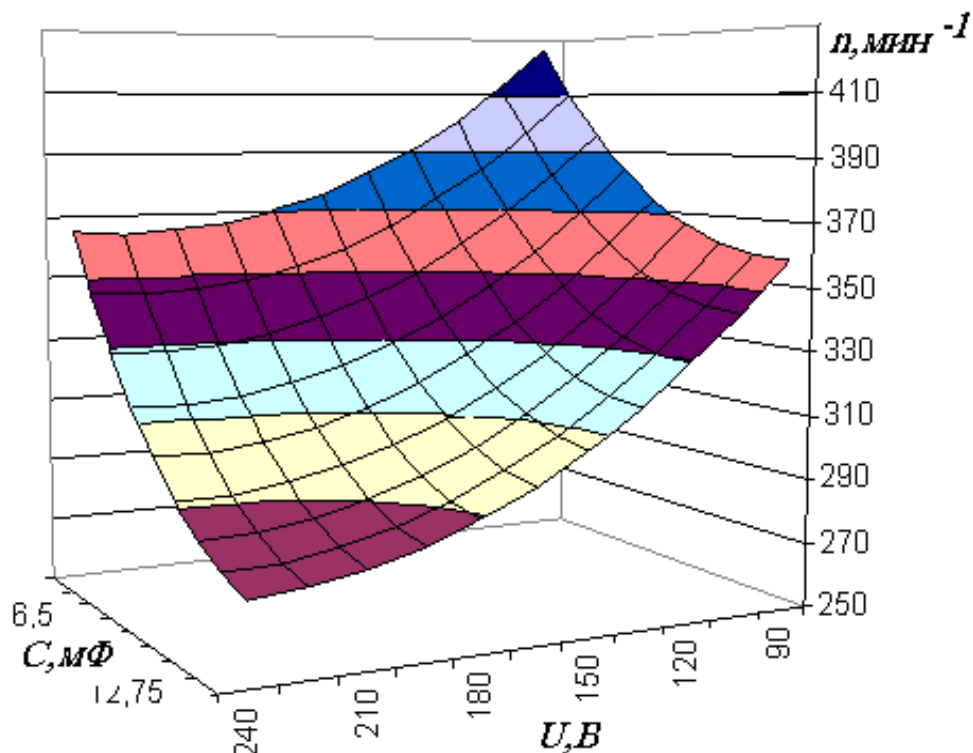
Для оценки влияния характеристик конденсаторного накопителя энергии и величины осевого канала r' на частоту ходов якоря n ЛЭМД-привода, воспользуемся планом эксперимента (табл.5.6). После составления матрицы планирования трехфакторного эксперимента (табл.5.8), оценки точности и надежности измерений (Приложение 8, табл.П8.5) и коэффициентов регрессионного уравнения по (5.17) – (5.20), аппроксимирующее уравнение будет иметь вид:

$$n=320-43,2\bar{X}_1-36\bar{X}_2-27\bar{X}_3-6\bar{X}_1\bar{X}_2-15\bar{X}_1\bar{X}_3-15\bar{X}_2\bar{X}_3+20\bar{X}_1^2+20\bar{X}_2^2+5\bar{X}_3^2. \quad (5.51)$$

Табл.5.8 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Номер серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	C, 10 ⁻³ Ф	U, В	r/	y ₃				У _{расч}	Δy
							y ₃₁	y ₃₂	y ₃₃	$\bar{y}$		
1	–	–	–	2,75	90	0,1	370	365	372	369	375,3	6,3
2	+	–	–	12,75	90	0,1	280	286	278	281,3	282,4	1,07
3	–	+	–	2,75	240	0,1	350	351	352	351	354,7	3,7
4	+	+	–	12,75	240	0,1	240	245	241	242	245,1	3,1
5	–	–	+	2,75	90	0,7	410	416	409	411,7	420	5,53
6	+	–	+	12,75	90	0,7	306	308	310	308	309,1	1,1
7	–	+	+	2,75	240	0,7	380	382	386	382,7	390,5	7,8
8	+	+	+	12,75	240	0,7	256	259	250	255	262	7
9	0	0	0	7,5	165	0,4	331	330	328	329,7	320	9,67
10	+	0	0	12,75	165	0,4	275	272	277	274,7	280,2	5,53
11	–	0	0	2,75	165	0,4	355	355	359	356,3	360,6	4,27
12	0	+	0	7,5	240	0,4	320	322	326	322,7	328,2	5,53
13	0	–	0	7,5	90	0,4	300	300	303	301	305,2	4,2
14	0	0	+	7,5	165	0,7	320	322	324	322	325,6	3,6
15	0	0	–	7,5	165	0,1	350	355	351	352	359,1	7,1

Как следует из (5.51) емкость конденсаторного накопителя с коэффициентом «–43,2» и напряжения U с коэффициентом «–36» существенно влияют на частоту ходов n .

Рис.5.26 – Поверхность отклика $n=f(C, U)$ при r' на уровне «0» ($r'=0,4$)

Поверхность отклика $n = f(C, U)$ при $r' = const$ (на уровне «0») показана на рис.5.26. Наибольшее значение n достигается, когда напряжение U и емкость C промежуточного накопителя энергии находятся на уровне «-1» ($C=2,75 \cdot 10^{-3}$ Ф; $U=90$ В) [119,120].

Продифференцировав уравнение (5.51) по переменным $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$ и $\bar{X}_3$, получим, что аппроксимирующий полином не обладает экстремумом в выбранном диапазоне. Тогда предпочтительный режим ЛЭМД-привода по частоте срабатываний оценивают по величине коэффициентов в регрессионном уравнении (5.51).

Для оценки влияния показателей накопителя (C , U) и двигателя (r') на КПД машины представим матрицу планирования экспериментов в виде табл.5.9. Результаты оценки точности и надежности измерений представлены в Приложении 8, табл.П8.6.

Для получения аналитической зависимости коэффициента полезного действия η от влияющих на него факторов C , U , r' составим матрицу планирования трехфакторного эксперимента (табл.5.9), оценим точность и надежность измерений.

Табл.5.9 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	C, Ф	U, В	r'	y_{Σ}				Урасч	Δy
							$y_{\Sigma 1}$	$y_{\Sigma 2}$	$y_{\Sigma 3}$	$\bar{y}$		
1	–	–	–	2,75	90	0,1	29,9	29,7	30	29,87	30	0,1
2	+	–	–	12,75	90	0,1	22,3	22,5	22,1	22,3	22,5	0,2
3	–	+	–	2,75	240	0,1	25,1	25,3	25	25,13	25,1	0,03
4	+	+	–	12,75	240	0,1	17,5	17,2	17,5	17,4	17,5	0,1
5	–	–	+	2,75	90	0,7	22	22,3	22,3	22,2	22,1	0,1
6	+	–	+	12,75	90	0,7	24,9	25	25,1	25	24,9	0,1
7	–	+	+	2,75	240	0,7	26,8	26,8	27	26,87	26,5	0,37
8	+	+	+	12,75	240	0,7	29,7	29,5	29,8	29,67	29,1	0,57
9	0	0	0	7,5	165	0,4	36	36,4	36,5	36,3	35,9	0,4
10	+	0	0	12,75	165	0,4	28,7	28,9	28,7	28,77	28,2	0,57
11	–	0	0	2,75	165	0,4	31,5	31,6	32	31,7	31	0,7
12	0	+	0	7,5	240	0,4	35	35,3	34,8	35,03	35,2	0,2
13	0	–	0	7,5	90	0,4	35,1	35,1	35	35,07	35,1	0,03
14	0	0	+	7,5	165	0,7	35,8	35,6	36	35,8	36,1	0,3
15	0	0	–	7,5	165	0,1	34,6	34,2	34,5	34,43	34,7	0,26

По рекомендациям, изложенным в п.п. 5.1.1, определим зависимость (5.49): $\eta=f(C, U, r')$. После очевидных преобразований получим регрессионное уравнение:

$$\eta=36-0,4\bar{X}_1+1,3\bar{X}_3+3,7\bar{X}_1\bar{X}_3+3,2\bar{X}_2\bar{X}_3-8,9\bar{X}_1^2-2,9\bar{X}_2^2-3,9\bar{X}_3^2 \quad (5.52)$$

Уравнение (5.52) позволяет оценить влияние показателя C конденсаторного накопителя и уровня напряжения U на его обкладках на значение КПД ЛЭМД-привода при различных величинах r' . Поверхность отклика для случая $\eta = f(C, U)$ при $r' = const$ (на уровне «0») показана на рис.5.27.

Из диаграммы (рис.5.27) следует, что максимальное значение КПД η обеспечивается при кодированных значениях C и U на уровне «0». Повышение напряжения U заряда конденсаторного накопителя от «0» до «+1» плавно снижает КПД, что обусловлено значительными скоростями изменения величин i и ψ и значительными по величине вихревыми токами в магнитопроводе.

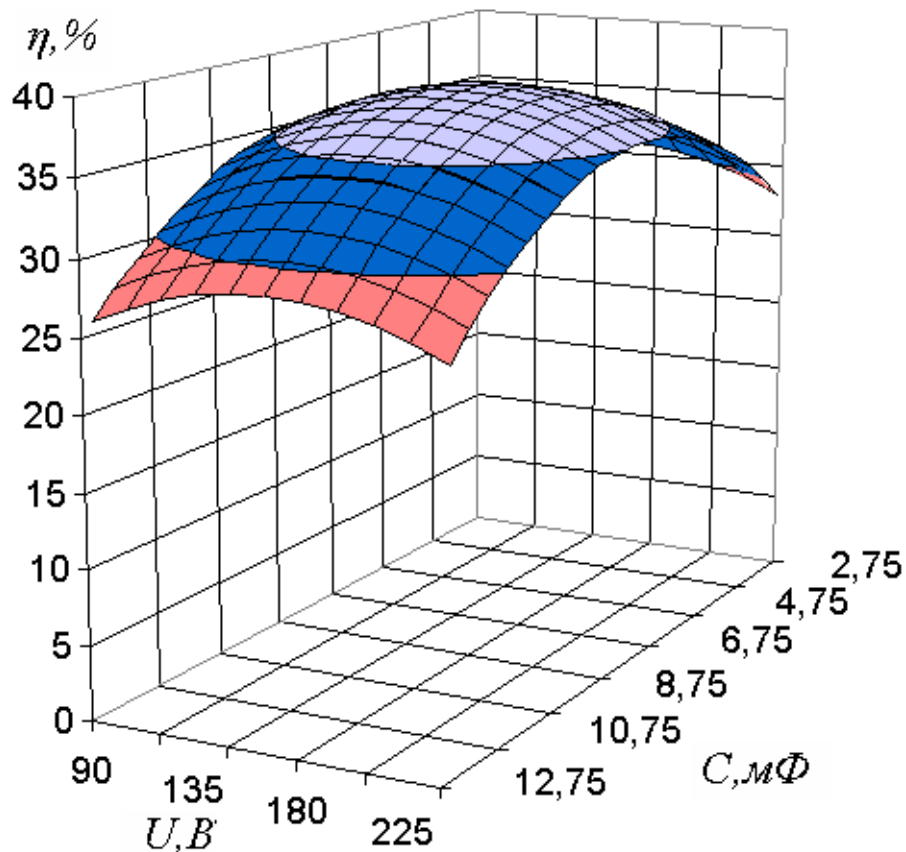


Рис.5.27 – Поверхность отклика $\eta=f(C, U)$ при $r' = const$ на уровне «0» ($r'=0,4$).

При большем значении емкости конденсаторного накопителя, например, в диапазоне от «0» до «+1» обеспечивается плавный процесс разряда большей продолжительности, обеспечивающий избыточную длительность рабочего цикла ЛЭМД, большие потери и меньший КПД.

Таким образом, из экспериментов следует, что основные показатели статического режима линейного электромагнитного двигателя, оснащенного осевым каналом величиной не более 0,3 от диаметра якоря, снижаются не более чем на 15 % по сравнению с ЛЭМД без канала [119,120,124].

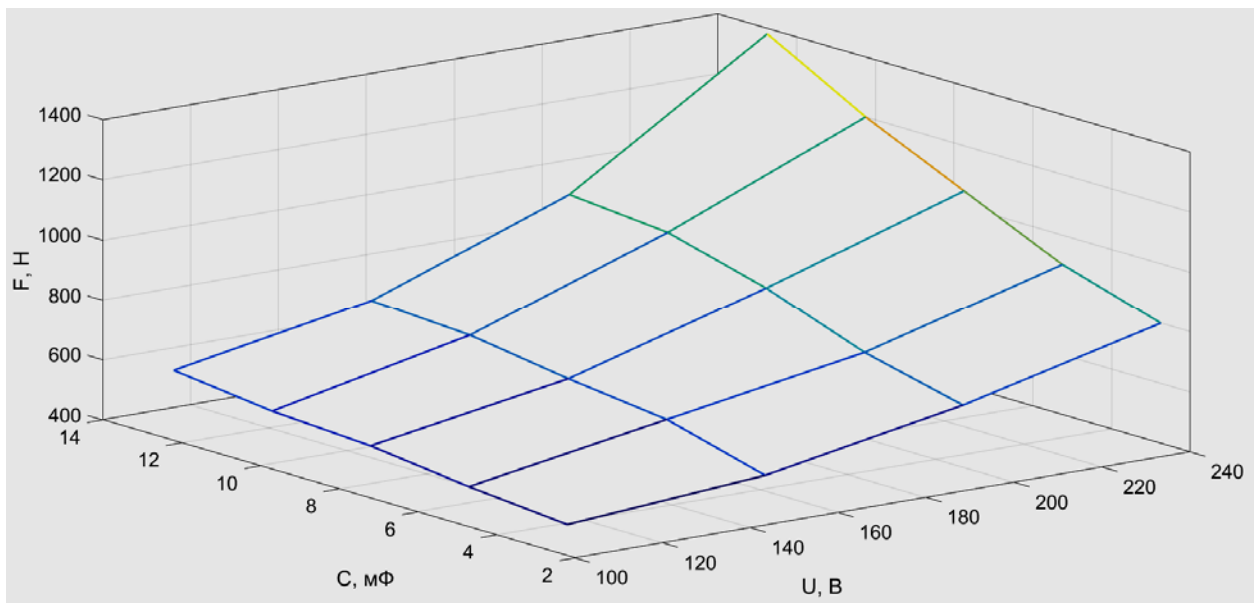


Рис.5.28 – Диаграмма $F_T=f(U, C)$ при r' на уровне «0» ($r'=0,4$).

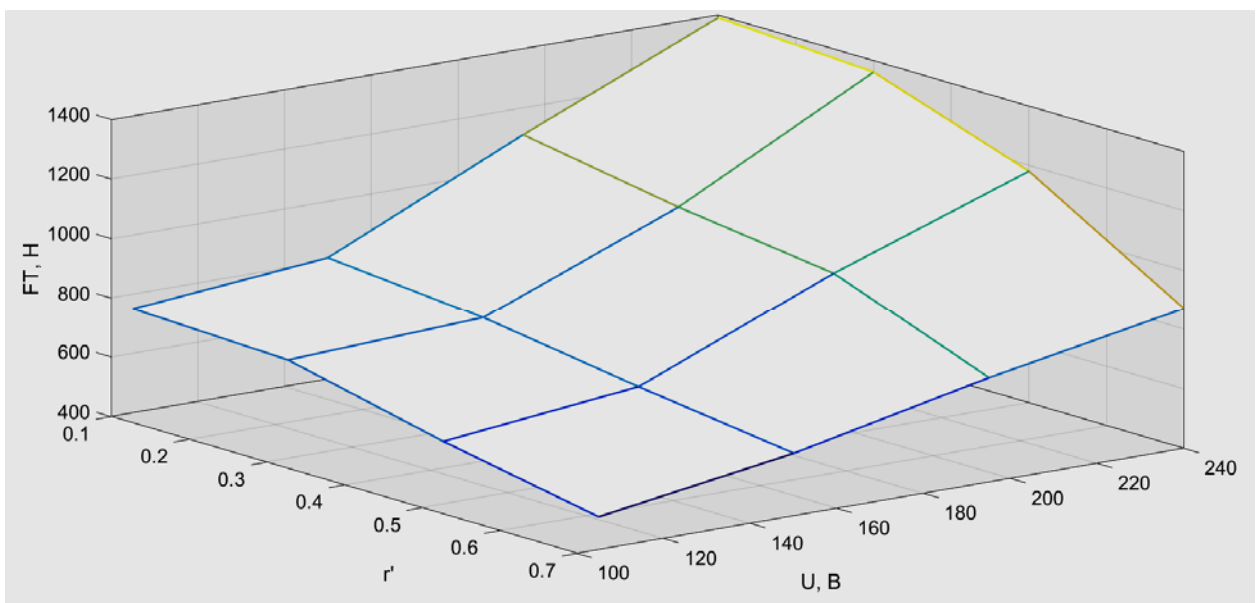


Рис.5.29 – Диаграмма $F_T=f(U, r')$ при C на уровне «+1» ($C=12,75 \cdot 10^{-3}$ Ф).

На рис.5.28 и рис.5.29 приведены результаты имитационного моделирования (рис.2.7) в виде диаграмм для уравнения (5.49). Сравнение с поверхностями отклика (рис.5.24 и рис.5.25) показывает приемлемую сходимость теоретических и экспериментальных результатов исследований, поскольку погрешность не превышает 15 %.

5.3 Выводы по пятой главе

Исследованием физических и полученных на основе теории планирования экспериментов математических моделей ЛЭМД-привода показана предпочтительность электропитания этих систем от комбинированных источников, оснащаемых разделенным на секции емкостным накопителем и улучшающих показатели регулирования выходной механической энергии системы. Показано, что для ЛЭМД-приводов ударного типа с диапазоном выходной механической энергии до 50 Дж наилучшая совокупность удельных силовых, энергетических показателей, КПД достигается сочетанием значений емкости $C=0,04...0,06$ Ф и напряжения $U=60...80$ В.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ЛЭМД-ПРИВОДОВ

Представленные в предыдущих разделах результаты позволили разработать на базе цилиндрических однообмоточных электромеханических преобразователей электромагнитного типа ударные и безударные ЛЭМД-приводы и машины, например, для неторцевой забивки продольно-неустойчивых стержневых элементов, кормораздаточных транспортеров, клипсования упаковки сельхозпродукции, сводообрушения, шприцевания колбасного фарша и другого назначения. Новизна примененных при создании этих систем и их элементов технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения и полезные модели. Воплощенные на практике изделия, прошедшие полевые и производственные испытания, представлены на рис.6.1–6.3 [195,197,198,199,202,236,249,250].

6.1 Производственные испытания ЛЭМД-приводов

6.1.1 Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции

Технические возможности и эффективность использования ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции подтверждена производственными испытаниями на Саратовском хлебозаводе ОАО «Знак Хлеба», г. Саратов, которые проводились в период с 11 ноября по 27 ноября 2019 года на участке упаковки хлебобулочных изделий (рис.6.1).



Рис.6.1 – Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства клипсования упаковки сельхозпродукции на предприятии ОАО «Знак Хлеба»

Производственная проверка электромагнитного клипсатора показала его работоспособность и надежность при выполнении технологического процесса наложения скрепок на упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий, высокие удельные показатели, компактность, хорошие массогабаритные и энергетические показатели, возможность ручной перестановки в цехе, минимальное время подготовки и запуска в работу.

6.1.2 Производственные испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт

Полевые испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт были проведены совместно со специалистами ООО «МСК Энерго» г. Саратов.



Рис.6.2 – Полевые испытания ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт: 1 – электромагнитная ударная машина; 2 – устройство управления; 3 – емкостной накопитель энергии; 4 – аккумуляторный источник питания

Цель испытаний – выяснить техническую возможность и эффективность применения ЛЭМД-привода для погружения металлических стержневых элемен-

тов в грунт, используемых, в частности в качестве электродов заземления. **В программу испытаний** входила механизированная забивка металлических стержневых элементов в грунты различной плотности (рис.6.2).

ЛЭМД-привод состоит из электромагнитной ударной машины, устройства управления, аккумуляторного источника питания, емкостного накопителя. Ударная машина включает линейный электромагнитный двигатель со сквозным осевым каналом и зажимным приспособлением для передачи ударного воздействия стержню через его боковую поверхность.

Привод имеет необходимые массогабаритные и энергетические показатели, технологичен в изготовлении, надежен в работе.

Производственные испытания показали работоспособность созданного переносного ЛЭМД-привода. Время забивки одного стержня диаметром 14 мм и длиной до 2 м в зависимости от плотности грунта составляет 40 – 90 с, что превосходит показатели забивки ручным способом. Кроме того, установлено, что механизированная забивка металлических продольно неустойчивых стержней с помощью ЛЭМД-привода обеспечивает уменьшение числа работающих на забивке операторов.

6.1.3 Производственные испытания ЛЭМД-привода для сводообрушения

Производственные испытания ЛЭМД-привода для обрушения и предотвращения сводообразования сыпучих материалов, например, муки, в металлических бункерах были проведены совместно с к.т.н., доцентом Волгиным А.В. на Саратовском хлебозаводе ОАО «Знак Хлеба» г. Саратов (рис.6.3) и крестьянско-фермерском хозяйстве ИП «Глава КФХ «Пасечный Андрей Иванович» р.п. Лысые Горы Саратовской области (рис.6.4).

Сводообрушитель крепился на кронштейне к наружной конусной части бункера. В зависимости от настройки электромагнитная машина производила от одного до трех ударов по бункеру одновременно с включением шнекового питателя. Величина энергии единичного срабатывания обеспечивалась в диапазоне от 15 до 35 Дж.

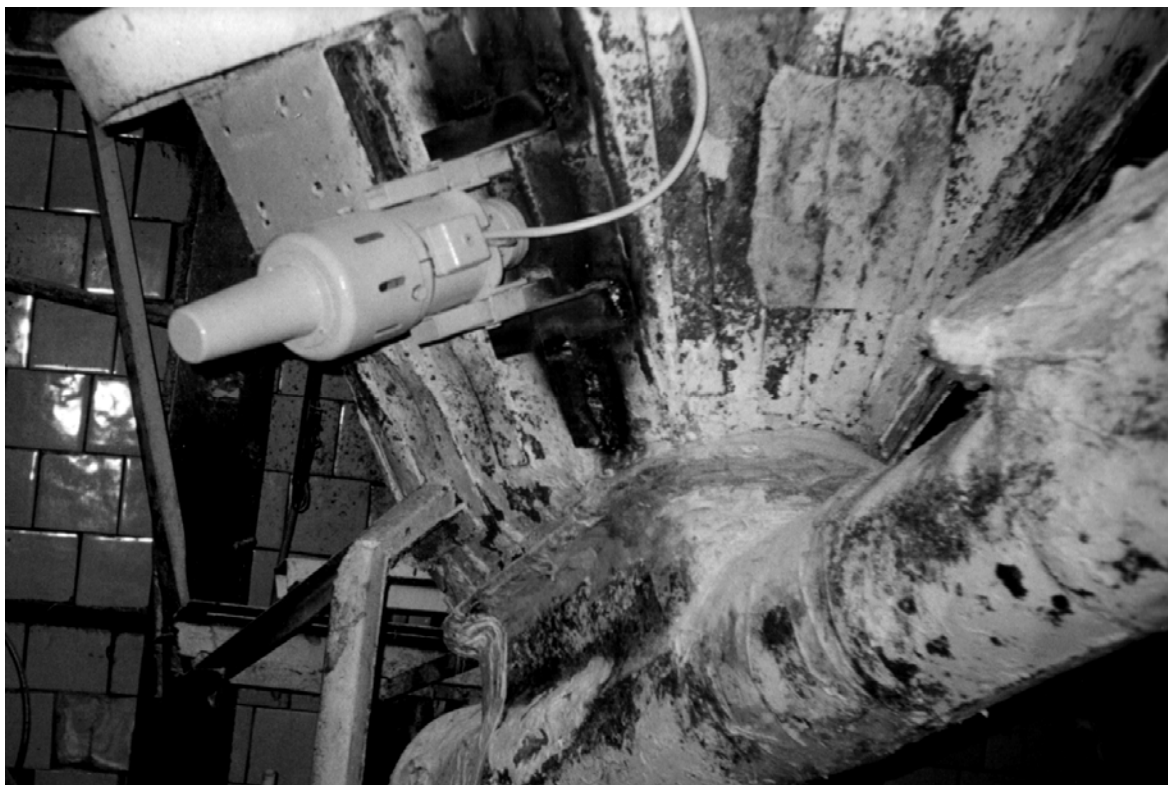


Рис.6.3 – Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства для сводообрушения на Саратовском хлебозаводе ОАО «Знак Хлеба» г. Саратов

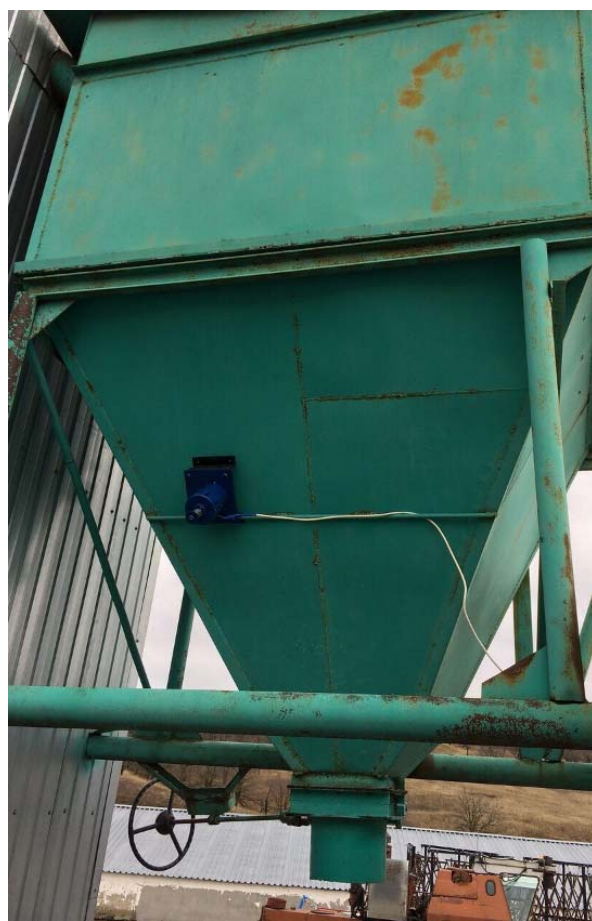


Рис.6.4 – Производственные испытания ЛЭМД-привода устройства для сводообрушения в крестьянско-фермерском хозяйстве ИП «Глава КФХ «Пасечный Андрей Иванович

Испытания показали, что выходная механическая энергия ЛЭМД-привода обеспечивала бесперебойное истечение муки из бункера. Образования сводов в течение производственных испытаний не отмечено. Дополнительного принудительного включения ударной машины не требовалось. Производительность бункера увеличилась, в среднем, на 22 %.

Крепление ЛЭМД-привода сводаобрушителя на внешней поверхности бункерного устройства исключает загрязнение продукта и обеспечивает соответствие предъявляемым санитарным требованиям.

ЛЭМД-привод ударного сводаобрушителя обеспечивает минимальное, по сравнению с устройствами аналогичного назначения, энергопотребление, соответствует требованиям электробезопасности, прост в эксплуатации и обслуживании.

6.2 Технико-экономическая оценка результатов внедрения ЛЭМД-приводов

6.2.1 Технико-экономическая оценка внедрения ЛЭМД-привода для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт

При оценке экономической эффективности новых и применяемых машин необходимо определить их влияние на изменение [195]:

- потребления электроэнергии, топлива, расхода материалов;
- трудоемкости выполняемых работ, условий труда работников и экологической обстановки;
- стоимости машин, средств автоматизации, систем управления и энергообеспечения.

Отмеченные критерии влияют на экономическую эффективность применения техники и величину годового экономического эффекта.

Основным приемом выявления экономической эффективности капиталовложений в новую технику служит сравнение проектируемой новой машины со старой (базовой), используемой в производстве. Проведем сравнение предлагае-

мого автономного ударного ЛЭМД-привода с пневматическим приводом на базе ударной машины ПУМ-3.

Размер абсолютных капитальных K (единовременных) вложений определяется ценой оборудования и дополнительными расходами на приведение в состояние готовности его к эксплуатации [195].

Определим капитальные затраты на пневматический $K_{ПП}$ и ЛЭМД-привод $K_{ЭМП}$:

$$K_{ПП} = K_{ПУМ} + K_{КОМП} + K_{ПР}; \quad (6.1)$$

$$K_{ЭМП} = K_{ЛЭМД} + K_{ЭП} + K_{ИП}, \quad (6.2)$$

где $K_{ПУМ}$ – капиталовложения в пневмоударную машину ПУМ-3; $K_{КОМП}$ – капиталовложения в автономный дизельный компрессор; $K_{ПР}$ – капиталовложения на вспомогательное оборудование, например, воздушные шланги и др.; $K_{ЛЭМД}$ – капиталовложения в ударную машину с ЛЭМД; $K_{ЭП}$ – капиталовложения в электрический преобразователь; $K_{ИП}$ – капиталовложения в автономный, например, аккумуляторный, источник питания.

Примерная стоимость оборудования по ценам 2019 года представлена в табл.6.1.

Табл.6.1 – Примерная стоимость оборудования

Капиталовложения K , руб.					
$K_{ПП}$, руб.			$K_{ЭМП}$, руб.		
$K_{ПУМ}$, руб.	$K_{КОМП}$, руб.	$K_{ПР}$, руб.	$K_{ЛЭМД}$, руб.	$K_{ЭП}$, руб.	$K_{ИП}$, руб.
60000	400000	5000	10000	20000	10000
ИТОГО:		465000	ИТОГО:		40000

Все показатели должны быть сопоставимы, поэтому целесообразно вести сравнение удельных показателей, приходящихся на единицу продукции или объёма работ.

Годовой объём работ одинаков и равен для двух вариантов оценки:

$$Q = W \cdot t, \quad (6.3)$$

где W – количество стержней, забиваемых в день, шт.; t – количество дней работы за год. С учетом опыта проектирования среднее значение забиваемых стержней в год составляет $Q \approx 2500$ шт.

Эксплуатационные затраты S определяются:

$$S = S_{ЗП} + S_A + S_{ТОРХ} + S_{ЭЭ} + S_B, \quad (6.4)$$

где $S_{ЗП}$ – заработная плата с начислениями, руб.; S_A – амортизационные отчисления, руб.; $S_{ТОРХ}$ – затраты на техническое обслуживание, ремонт и хранение техники, руб.; $S_{ЭЭ}$ – затраты на электроэнергию, руб.; S_B – затраты на сжатый воздух, руб.

Заработная плата производственных рабочих рассчитывается:

$$S_{ЗП} = \sum b_i \cdot t \cdot m \cdot K_{ДОП} \cdot K_{ПРЕМ} \cdot K_{СОЦ}, \quad (6.5)$$

где b_i – часовая тарифная ставка рабочего, руб./ч; t – время работы в году, ч; m – число дней работы за год; $K_{ДОП}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату (отпуска, сверхурочные работы); $K_{ПРЕМ}$ – коэффициент, учитывающий премии; $K_{СОЦ}$ – коэффициент, учитывающий начисления по социальному страхованию; $S_{ЗП.ПП} = S_{ЗП.ЭУМ} \approx 41513$ руб.

Амортизация S_A рассчитывается с использованием установленных норм амортизации в процентах к первоначальной (балансовой) стоимости привода:

$$S_{A.ПП} = K_{ПП} \cdot a; \quad (6.6)$$

$$S_{A.ЭУМ} = K_{ЭМУ} \cdot a, \quad (6.7)$$

где $S_{A.ПП}$ – затраты на амортизацию пневмоударного привода; $S_{A.ЭМП}$ – затраты на амортизацию ЛЭМД-привода; a – норма амортизации ($a=0,15$); $S_{A.ПП} = 69750$ руб., $S_{A.ЭМП} = 6000$ руб.

Определим затраты на ТОРХ:

$$S_{ТОРХ.ПП} = K_{ПП} \cdot r; \quad (6.8)$$

$$S_{ТОРХ.ЭМП} = K_{ЭМП} \cdot r, \quad (6.9)$$

где $S_{ТОРХ.ПП}$ – затраты на ТОРХ пневмоударного привода; $S_{ТОРХ.ЭМП}$ – затраты на ТОРХ ЛЭМД-привода; r – норма отчислений на ТОРХ, ($r=0,18$); $S_{A.ПП} = 83700$ руб., $S_{A.ЭМП} = 7200$ руб.

Рассчитаем затраты $S_{ЭЭ}$ на электроэнергию для ЛЭМД-привода и затраты S_B на сжатый воздух для пневмоударного привода:

$$S_{ЭЭ} = Ц_{Э} \cdot P_{ЛЭМД} \cdot t \cdot m; \quad (6.10)$$

$$S_B = Ц_B \cdot q \cdot t \cdot m, \quad (6.11)$$

где $Ц_{Э}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт ч; $Ц_B$ – стоимость 1 м³ сжатого воздуха, руб.; q – расход сжатого воздуха, м³/мин; $P_{ЛЭМД}$ – мощность электромагнитной

ударной машины с ЛЭМД; t – время забивания одного стержня, ч; m – количество дней работы за год; $S_{ЭЭ} \approx 3700$ руб., $S_B = 28123$ руб.

Определим эксплуатационные затраты S с учетом (6.5)-(6.11):

$$S_{ПП} = 223086 \text{ руб.}, S_{ЭМП} = 53013 \text{ руб.}$$

Определим себестоимость C погружения одного стержня длиной 2 м:

$$C_{ПП} = S_{ПП} / Q; \quad (6.12)$$

$$C_{ЭМП} = S_{ЭМП} / Q, \quad (6.13)$$

где $C_{ПП}$ – себестоимость погружения одного стержня пневмоударным приводом; $C_{ЭМП}$ – себестоимость погружения одного стержня ЛЭМД-приводом; $C_{ПП} \approx 89$ руб., $C_{ЭМП} \approx 21$ руб.

Экономия прямых эксплуатационных расходов за рабочий период (условно-годовой экономией) определяется:

$$\mathcal{E}_Г = (C_{ПП} - C_{ЭМП}) \cdot Q; \quad (6.14)$$

$$\mathcal{E}_Г = (89 - 21) \cdot 2500 = 170000 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости ЛЭМД-привода составит:

$$T_{ОК} = K_{ЭМП} / \mathcal{E}_Г, \quad (6.15)$$

$$T_{ОК} = 40000 / 170000 \approx 0,3 \text{ года.}$$

Расчетный срок окупаемости не превышает нормативный [195,196], что свидетельствует о целесообразности внедрения ЛЭМД-привода.

Все методы экономических оценок следует классифицировать по двум признакам: «по их новизне в отечественной практике – традиционные и современные; по отношению к фактору времени – без учета продолжительности процесса инвестирования и времени действия инвестиций и с учетом этого, т.е. без учета и с учетом фактора времени.

Традиционные методы сравнительной и общей (абсолютной) экономической эффективности капиталовложений (инвестиций) широко использовались с 30-х годов XX века. В условиях рынка в нашей экономической науке и практике наряду с традиционными методами экономических оценок находят все большее применение новые, современные методы, основанные на методологии развитых стран и предлагаемые ЮНИДО» [195,196].

В настоящее время при оценке эффективности инновационных проектов общепризнанным является метод дисконтирования, т.е. приведение разновременных доходов и расходов, осуществляемых в рамках инвестиционного проекта, к единому (базовому) моменту времени.

Чистый дисконтированный доход (*net present value, NPV*) или интегральный эффект определяется по выражению:

$$NPV = - \sum_0^T I \cdot 1/(1+E)^t + \sum_1^T CF \cdot 1/(1+E)^t, \quad (6.16)$$

где I – затраты на инвестиции (*investment*), руб.; CF – чистый денежный доход за период эксплуатации объекта (*cash flow*); E – норма дисконта, равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал; T – продолжительность расчетного периода или горизонт расчета; t – номер шага расчета, как правило, по годам, начиная с момента начала осуществления проекта.

Определим чистый дисконтированный доход, который предприятие получит при эксплуатации ЛЭМД-привода в течение 6 лет, при норме дисконта 15 %. Расчет чистого дисконтированного дохода представлен в табл. 6.2.

Табл.6.2 – Расчет чистого дисконтированного дохода

Показатели	Годы						
	0	1	2	3	4	5	6
Отток, тыс. руб.							
Капиталовложения	40						
Приток, тыс. руб.							
Экономия прямых эксплуатационных расходов		170	170	170	170	170	170
Результаты, тыс. руб.							
Дисконтный множитель	1	0,870	0,756	0,658	0,552	0,497	0,432
Приведенная разность	-40	147,9	128,52	111,86	93,84	84,49	73,44
ЧДД или интегральный эффект	600,05						

Наличие положительного ЧДД или интегрального эффекта в размере 600,05 тыс. руб. свидетельствует об экономической эффективности капиталовложений в ЛЭМД-привод для погружения в грунт продольно-неустойчивых стержневых элементов. Все технико-экономические расчеты сведем в табл.6.3.

Табл.6.3 – Техничко-экономические показатели внедрения ЛЭМД-привода для погружения в грунт продольно-неустойчивых стержневых элементов

Наименование показателей	Значение	
	Пневмоударный привод	ЛЭМД-привод
Капиталовложения (инвестиции), руб.	465000	40000
Эксплуатационные затраты, руб.	223086	53013
Себестоимость погружения одного стержня, руб.	89	21
Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб.	–	170000
Срок окупаемости, лет	–	0,3
Чистый дисконтированный доход или интегральный эффект за 6 лет, тыс. руб.	–	600

6.2.2 Техничко-экономическая оценка внедрения ЛЭМД-привода кормораздаточного транспортера

Оценку экономической эффективности внедрения ЛЭМД-привода кормораздаточного транспортера проведем в сравнении с приводом от асинхронного электродвигателя. Все расчеты представлены для одного кормораздатчика, установленного в птичнике клеточного содержания. Техничко-экономическая оценка аналогична методике, рассмотренной в п.6.2.1.

Размер капитальных K вложений определяется ценой оборудования.

Определим капитальные затраты на кормораздатчики с асинхронным приводом $K_{АД}$ и ЛЭМД-приводом $K_{ЛЭМД}$:

$$K_{АД}=41200 \text{ руб}; K_{ЛЭМД}= 19600 \text{ руб.}$$

Годовой объём работ одинаков и определяется:

$$Q = W \cdot t, \quad (6.17)$$

где W – количество циклов раздачи корма, производимых в день, шт.; t – количество дней работы за год; $Q \approx 1095$ шт.

Эксплуатационные затраты S определяются по (6.4) и с учетом (6.5)-(6.11):

$$S_{АД}=20341 \text{ руб.}, S_{ЛЭМД}=9534 \text{ руб.}$$

Определим себестоимость C одного цикла раздачи:

$$C_{АД} = S_{АД} / Q; \quad (6.18)$$

$$C_{ЛЭМД} = S_{ЛЭМД} / Q, \quad (6.19)$$

Наличие положительного ЧДД или интегрального эффекта в размере 775,072 тыс. руб. свидетельствует об экономической эффективности капиталовложений в ЛЭМД-привод кормораздаточного транспортера.

Все технико-экономические расчеты приведены в табл.6.5 для птицеводческого предприятия.

Табл.6.5 – Техничко-экономические показатели внедрения ЛЭМД-привода кормораздаточного транспортера

Наименование показателей	Значение	
	Привод с АД	ЛЭМД-привод
Капиталовложения (инвестиции), руб.	1519200	691200
Эксплуатационные затраты, руб.	732276	343224
Себестоимость одного цикла раздачи корма, руб.	18,58	8,7
Годовая экономия эксплуатационных расходов, руб.	—	389,448
Срок окупаемости, лет	—	1,8
Чистый дисконтированный доход или интегральный эффект за 6 лет, тыс. руб.	—	775,072

6.3 Выводы по шестой главе

На основе выполненных исследований усовершенствованы, созданы и испытаны в технологиях АПК ЛЭМД-приводы для кормораздачи, прессования и получения сока, шприцевания колбасного фарша, наложения скрепок на упаковку и др., повышающие эффективность и показатели качества выполняемых операций за счет электромеханизации и автоматизации процессов, соответствующие требованиям экологичности и безопасности.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Основные научные и практические результаты исследований состоят в следующем:

1. Оценены преимущества, показана конкурентность применения ЛЭМД-приводов в сельхозпроизводстве и предприятиях АПК, основанная на снижении: затрат на оборудование в 3...6 раз; энергопотребления для ударных и безударных операций, процессов и технологий – в 2...3 раза; материалоемкости приводов и машин – в 1,7...3 раза по сравнению с пневматическими и гидравлическими системами сходного назначения.
2. Исследованием теоретических и имитационных моделей магнитной системы, процессов нагревания-охлаждения цилиндрических электромеханических электромагнитных преобразователей установлено и для магнитных систем экспериментально, на физических образцах ЛЭМД-приводов, с расхождением до 17 %, подтверждено:
 - сквозной осевой канал диаметром до 0,3 диаметра якоря в магнитопроводе, снижающий силовые и энергетические показатели двухзазорного цилиндрического ЛЭМД до 15 % в сравнении с ЛЭМД без канала, расширяет функциональность и области эффективного применения и двигателей, и ЛЭМД-приводов;
 - повышение нормированного значения продолжительности включения ПВ или необходимое уменьшение нагрева ЛЭМД-привода обеспечивается: при нефорсированном энергопитании – увеличением исходной внешней теплоотдающей поверхности S двигателя до значения не более $2,5S$ при пренебрежимом снижении удельных показателей системы; при форсированном питании – интенсификацией движущимся якорем охлаждающих воздушных по-

- токов – самовентиляцией, – действие которой эквивалентно уменьшению теплового сопротивления исходного двигателя до 35 %;
- самовентиляция обеспечивает работу ЛЭМД-привода в продолжительном режиме S1, когда потребляемая за единичный цикл от источника энергия не превышает 550...600 Дж на квадратный метр охлаждающей поверхности двигателя.
3. Интегрирование в моноконструкцию ЛЭМД-привода и зажимного механизма со сферическими, взамен острооребранных конусных, поперечно-заклинивающими на рабочем ходе δ в осевом канале инструмент или рабочий орган элементами расширяет области эффективного применения, обеспечивая использование привода для одно- или попеременного двунаправленного перемещения S инструмента, многократно $n\delta$, $n=1,2,\dots$ превышающего рабочий зазор и ход δ якоря двигателя $S=n\delta$ и увеличивая ресурс инструмента.
 4. Применение в ЛЭМД-приводах адаптивных управляющих систем, оценивающих в смежных циклах изменение нагрузки или свойства среды, позволяет:
 - в системах ударного действия – снизить предопределяемую превентивной форсировкой избыточность выходной механической энергии на 20...30 % подстройкой параметров смежных совокупностей питающих электрических импульсов изменением характеристик источника питания;
 - в системах неударного типа – скорректировать по нагрузке тяговое усилие, добиться плавности хода инструмента в каждом цикле изменением напряжения и мощности питающих импульсов в диапазоне 0,3...1,0 при одновременном снижении потребляемой от источника цикловой энергии до 35 % в сравнении с нерегулируемыми приводами.
 5. Исследованием физических и полученных на основе теории планирования экспериментов математических моделей ЛЭМД-привода показана предпочтительность электропитания этих систем от комбинированных источников, оснащаемых разделенным на секции емкостным накопителем и улучшающих показатели регулирования выходной механической энергии системы. Показано, что для ЛЭМД-приводов ударного типа с диапазоном выходной механической энергии

до 50 Дж наилучшая совокупность удельных силовых, энергетических показателей, КПД достигается сочетанием значений емкости $C=0,04...0,06$ Ф и напряжения $U=60...80$ В.

6. На основе выполненных исследований усовершенствованы, созданы и испытаны в технологиях АПК ЛЭМД-приводы для кормораздачи, прессования и получения сока, шприцевания колбасного фарша, наложения скрепок на упаковку и др., повышающие эффективность и показатели качества выполняемых операций за счет электромеханизации и автоматизации процессов, соответствующие требованиям экологичности и безопасности.

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

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

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Рассмотренные в диссертации электромеханические преобразователи ЛЭМД-приводов – броневого цилиндрические двухзазорные линейные электромагнитные двигатели, не являются готовыми, серийно выпускаемыми изделиями. Поэтому применение ЛЭМД-приводов в виде законченных электромеханических систем в технологиях на предприятиях АПК требует выполнения комплекса проектных – по изготовлению рабочей документации и опытно-конструкторских работ, проведения испытаний вначале ограниченного типоразмерного ряда линейных электромагнитных двигателей с выходной механической энергией $A_y=50...500$ Дж с механизмами передачи мощности нагрузке. Другие необходи-

мые элементы электромеханической системы – источники питания, управляющие устройства, – целесообразно укомплектовывать серийно выпускаемыми изделиями: аккумуляторными батареями, программируемыми контроллерами, преобразователями напряжения, емкостными накопителями энергии, – с учетом назначения и области применения электромеханической системы.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atallah, K., Wang J., Howe D. A high-performance linear magnetic gear / Journal of Applied Physics, Vol. 97, No. 10, 10N516:1-3, 2005.
2. Boldea, I. Linear Electromagnetic Actuators and their Control: A Review // Proceedings of the 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC '2002), Cavtat & Dubrovnik (Croatia), 2002, on CD: KEY-01.pdf.
3. Kargin, V.A. Adaptive system for automatic control of output effort of electromagnetic sausage-filler / V.A. Kargin, A.V. Volgin, A.P. Moiseev. – 14TH International Scientific-Technical conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings APEIE-2018 Volumes 1 Part 6 – 44894.
4. Kargin, V.A. Electromagnetic strike action system with self-adjustment of output energy / V.A. Kargin, A.V. Volgin // В сборнике 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 20184 January 2019, Номер статьи 8602647
5. Kargin, V.A. Evaluation of the possibility of using self-ventilation to cool forced electromagnetic shock engines / V.A. Kargin, A.V. Volgin, A.P. Moiseev, A.M. Maradudin., A.A. Leontiev // В сборнике IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032009
6. Kargin, V.A. Increasing the efficiency of a linear stepper electromagnetic engine / V.A. Kargin, A.P. Moiseev, A.M. Maradudin, A.V. Peretyatko. – В сборнике: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032008.
7. Kargin, V.A. The electromagnetic juice press control system / V.A. Kargin, A.V. Volgin, A.P. Moiseev // В сборнике 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 20184 January 2019, Номер статьи 8602715.

8. Kramer E., Liu H., Seitz N., Hirzinger G. A multisensory linear actuator system // *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 7, pp. 182 –185, 2002.
9. Sobhi-Najafabadi B., Halim D., Sliva E., Tonkin M. Multiplerotor permanent magnet dc motor topologies for low-cost manufacturing // *International Manufacturing Leaders Forum on Global Competitive Manufacturing*, 2005.
10. Usanov K.M. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power / K.M. Usanov, A.V. Volgin, V.A. Kargin, E.A. Chetverikov, A.P. Moiseev // В сборнике IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 052031
11. Usanov K.M. Electric converters of electromagnetic strike machine with capacitor supply / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. V.A. Kargin, Chetverikov, A.P. Moiseev // В сборнике IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 052031
12. Usanov, K.M. Power electromagnetic strike machine for engineering-geological surveys / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. Chetverikov, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, Z.I. Ivanova // В сборнике IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2017. – 87 032049
13. Usanov, K.M. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. Chetverikov, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, Z.I. Ivanova // В сборнике IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2017. – 87 032050
14. Volgin, A.V. Pulse system electromagnetic linear engine for vaults downfall in bunkers // A.V. Volgin, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, E.A. Chetverikov, E.V. Volgina, L.A. Lagina // В сборнике: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 194 (2018) 032030.
15. Wang J., Howe D., Jewell G. Analysis and design optimization of an improved axially magnetized tubular permanent-magnet machine // *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 289 – 295, 2004.
16. Wenlong Li and Chau K.T. A Linear Magnetic-gear Free-piston Generator for Range-extended Electric Vehicles / *Journal of Asian Electric Vehicles*, Volume 8, Number 1, June 2010.

17. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976.
18. Артемьев, В.Г. Пружинно-транспортирующие органы сельскохозяйственных машин: Учебное пособие / В.Г. Артемьев. – Ульяновск: СХИ, 1995. – 200 с.
19. Архипенко, А.П. Гидравлические ударные машины [Текст] / А.П. Архипенко, А.И. Федулов. – Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1991. – 107с.
20. Аипов, Р.С. Плоский асинхронный электропривод жерновой мельницы / Р.С. Аипов, Р.Р. Галиуллин, Р.Р. Нугуманов, Б.Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. – № 2 (53). – С. 77-82.
21. Багоцкий, В.С. Химические источники тока [Текст] / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
22. Барышев, В.В. Устройство для образования и наложения скрепок на концы колбасных оболочек или пакетов / В.В. Барышев, В.А. Новоженин, Р.Г. Сорокина, Б.Н. Нечипоренко. – Патент на полезную модель ФРГ №2711430, кл. А22 С 11/12. Бюл.1982, № 3.
23. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
24. Богинский, В.П. О классификации зажимных механизмов [Текст] / В.П. Богинский, Б.Н. Смоляницкий, Ю.Н. Сырямин // Виброударные процессы в строительном производстве. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
25. Богинский, В.П. Пневмоударные машины для погружения легких стержневых элементов / В.П. Богинский, Б.Н. Смоляницкий // ФТПРПИ, № 2. – 1981.
26. Богомягких, В.А. Интенсификация разгрузки сельскохозяйственных бункеров в условиях сводообразования зернистых материалов: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.А. Богомягких. – зерноград, 1986.
27. Богомягких, В.А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов [Текст] / В.А. Богомягких. – Изд-во Ростовского университета, 1973 – 152 с.

28. Болотовский, В.И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов [Текст] / В.И. Болотовский, З.И. Вайсгант. – Л.: Энергоиздат, 1989. – 208 с.
29. Борисенко, А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах [Текст] / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
30. Борисенко, А.И. Охлаждение промышленных электрических машин [Текст] / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
31. Бредихин, С.А. Технологическое оборудование мясокомбинатов / С.А. Бредихин. – М.: Колос, 2005.
32. Бут, Д.А. Накопители энергии / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
33. Бухаров, А.И. Средства заряда аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Справочник [Текст] / А.И. Бухаров, И.А. Емельянов, В.И. Судаков. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
34. Валишин, Д.Е. Математическая модель линейного асинхронного привода плунжерного насоса с периодической коммутацией фазы источника трёхфазного напряжения / Д.Е. Валишин, Р.С. Аипов, // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. – Т. 12. № 4. – С. 13-20.
35. Варыпаев, В.Н. Химические источники тока [Текст] / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасоян, В.А.Никольский. – М.: Высшая школа, 1990. – 240 с.
36. Василенко, П.М. Механизация и автоматизация процессов приготовления и дозирования кормов / П.М. Василенко, И.И. Василенко. – М.: Агропромиздат, 1985.
37. Волгин, А.В. Интенсификация разгрузки бункерных устройств за счет сводообрушения импульсными электромагнитными системами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Волгин– Саратов, ФГОУ ВПО СГАУ им. Вавилова Н.И., 2005. – 23 с.
38. Воробьев, В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер // Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.

39. Выриханов, Д.А. Алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров. – Вопросы электротехнологии: науч. техн. журнал СГТУ. Саратов, 2014 №1(2). – С. 90 – 95.
40. Выриханов, Д.А. Анализ взаимосвязей электрических контуров в обобщенном электромеханическом преобразователе энергии / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров. – Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 3. – С.33 – 37.
41. Выриханов, Д.А. Анализ мощностных и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. СГТУ. – Саратов, 2004. – С. 192 – 198.
42. Выриханов, Д.А. Математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии: науч. техн. журнал СГТУ. – Саратов, 2013 №1. – С. 61 – 64.
43. Выриханов, Д.А. Матричная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров. – Вопросы электротехнологии: науч. техн. журнал СГТУ. Саратов, 2014 №4(5). – С. 30 – 33.
44. Выриханов, Д.А. Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин / Д.А. Выриханов, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вестник СГТУ, 2006. № 3. – С. 78 – 83.
45. Выриханов, Д.А. Оптимизация режимов энергопреобразования в линейном электромагнитном двигателе / Д.А. Выриханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: Межвузовский научный сборник, СГТУ, 2004. – С. 13-18.
46. Гальперин, Л.Г. Основы гидрогазодинамики [Текст] / Л.Г. Гальперин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 238 с.
47. Гельфанд, Я.С. Выпрямительные блоки питания и зарядные устройства в схемах релейной защиты [Текст] / Я.С. Гельфанд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
48. Горбунов, В.Ф. Импульсный гидропривод горных машин [Текст] / В.Ф. Горбунов, А.Г. Лазуткин, Л.С. Ушаков. – Новосибирск, Наука, 1986. – 198 с.

49. Горбунов, В.Ф. Ручные пневматические молотки [Текст] / В.Ф. Горбунов, В.И. Бабуров и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 184 с.
50. Гордон, С.В. Заземляющие устройства в сельских электросетях [Текст] / С.В. Гордон // Техника в сельском хозяйстве. – 1973. – № 3.
51. Гордон, С.В. Монтаж заземляющих устройств [Текст] / С.В. Гордон. – М.: «Колос», 1975. – 160 с.
52. Гринчар, Н.Г. Надежность гидроприводов путевых, строительных и грузоподъемных машин: Учебное пособие / Н.Г. Гринчар – М.: МГУПС, 2004. – 112 с.
53. Гурницкий В.Н. Линейный управляющий электродвигатель: Монография / В.Н. Гурницкий. – Ставрополь, 1992. – 319 с.
54. Гячев, Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах [Текст] / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968.
55. Газиев А.Х. Анализ магнитных цепей с учетом распределенных магнитных параметров / А.Х. Газиев, В.И. Чарыков, С.А. Соколов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. – № 2 (34). – С. 73-77.
56. Дубровский, А.А. Вибрационная техника в сельском хозяйстве [Текст] / А.А. Дубровский. – М.: «Машиностроение». – 1968. – 204 с.
57. Дуда, А.И. Технологическое оборудование мясоперерабатывающей отрасли. Учебное пособие / А.И. Дуда. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2006. – 360 с.
58. Дьяконов В.П. Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. / Дьяконов В.П. М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с.
59. Евдокимов, А.А. Исследование распределения индукции магнитного поля в межполюсном пространстве сепаратора УМС-4М / А.А. Евдокимов, В.И. Чарыков // Аграрный вестник Урала. 2015. – № 4 (134). – С. 53-57.
60. Ефимов, И.Г. Теория регулируемых линейных электромагнитных приводов и их применение в системах управления техническими объектами: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / И.Г. Ефимов – Санкт-Петербургский ГТУ, 1995. – 32 с.
61. Забашта, А.Г. Технология мяса и мясных продуктов / А.Г. Забашта, Г.П. Казюлин, И.А. Рогов. – М.: Колос, 2009. – 565 с.

62. Замятин, В.Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 с.
63. Здрок, А.Г. Выпрямительные устройства стабилизации напряжения и заряда аккумуляторов [Текст] / А.Г. Здрок. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 144 с.
64. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. Пер. с англ. – М., Мир, 2005 – 541 с.
65. Зенков, Р.Л. Бункерные устройства [Текст] / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение. – 1977.
66. Зонин, В.Г. Современное производство колбасных и солено-копченых изделий / В.Г. Зонин. – СПб.: Профессия, 2006, – 224 с.
67. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 909 с.
68. Ивашов, В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: Учеб. пособие / В.И. Ивашов. – СПб.: Дели, 2007. – 464 с.
69. Ильин В.А., Ким Г.Д. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2007. – 400 с.
70. Каргин, В.А. Автоматизация систем управления технологическими процессами: Учебное пособие / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, А.В. Волгин, Л.А. Лягина, Е.А. Четвериков. – Саратов: Амирит, 2018. – 177 с.
71. Каргин, В.А. Влияние конструктивных и режимных параметров на выходные показатели ЛЭМД ударной машины / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, М.Ю. Сахнов // Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2017. – С. 133-136.
72. Каргин, В.А. Методы анализа тепловых процессов в линейных электромагнитных двигателях / В.А. Каргин, А.С. Козлов, А.В. Егин // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IV Междунар. научно-практ. конф. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2013. – С. 126-129

73. Каргин, В.А. Методы расчета тепловых и гидравлических процессов в ЛЭМД импульсных машин / В.А. Каргин, А.М. Марадудин, Д.П. Щербаков // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VI Международной научно- практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2015. – С. 75-80
74. Каргин, В.А. Оценка надежности электроприводов с линейным перемещением рабочего органа в установках для клипсования колбасных изделий / В.А. Каргин, О.В. Логачёва, С.С. Лёвин // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. – С. 58-61.
75. Каргин, В.А. Оценка эффективности охлаждения линейных электромагнитных двигателей импульсных машин / В.А. Каргин, А.М. Марадудин, А.М. Щербаков // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VI международной научно- практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2015. – С. 157-160.
76. Каргин, В.А. Регистрация динамических характеристик электромагнитных двигателей импульсных машин / В.А. Каргин, А.В. Волгин, А.К. Федотов, А.С. Панкратов // В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК // Материалы X Международной научно-практической конференции. Саратов, 2019. – С. 113-116
77. Каргин, В.А. Система автоматического управления электромагнитным сводобрушителем / В.А. Каргин. – Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2019. № 6 (176). – С. 148-154
78. Каргин, В.А. Система с реверсивным линейным электромагнитным двигателем для формования колбасных изделий / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, С.М. Зубарев // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LI Международной научно-практической конференции, ч. V, Челябинск: ЧГАА, 2012. – С. 181-184.
79. Каргин, В.А. Система управления плавным ходом якоря ЛЭМД кормораздаточных транспортеров за счет автоматической корректировки выходного усилия /

- В.А. Каргин, А.П. Моисеев, А.В. Волгин, Н.Н. Белова. – Известия Международной академии аграрного образования. – Выпуск № 37 (2017). – С. 15-18.
80. Каргин, В.А. Система управления формователем колбасных изделий на базе программируемого логического контроллера / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, В.С. Никитин, Massad, A.Kh. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII Международной научно- практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2017. – С. 175-178.
 81. Каргин, В.А. Система управления электромагнитной ударной машиной / В.А. Каргин // Образовательная среда сегодня и завтра: Материалы X Международной научно-практической конференции, 2015. – С. 303-306
 82. Каргин, В.А. Система управления электромагнитным прессом для отжима сока / В.А. Каргин. – Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2019. № 4 (174). – С. 155-160.
 83. Каргин, В.А. Совершенствование технологии погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов на объектах АПК использованием переносного импульсного электромагнитного привода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.А. Каргин. – Саратов, ФГОУ ВПО СГАУ им. Вавилова Н.И., 2007. – 23 с.
 84. Каргин, В.А. Совершенствование электрического преобразователя электромагнитного привода кормораздаточного транспортера / В.А. Каргин, А.В. Волгин, А.П. Моисеев. – Известия Международной академии аграрного образования, №31, 2016. – С.41-43.
 85. Каргин, В.А. Тепловой расчет импульсного линейного электромагнитного двигателя / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, Т.А. Филимонова // Достижения науки-агропромышленному производству: материалы I Международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2011. – С.195-199.
 86. Каргин, В.А. Экспериментальные стенды для исследования электромагнитных машин / В.А. Каргин, А.П. Моисеев, М.Ю. Сахнов // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2017. – С. 109-113

87. Каргин, В.А. Электрический преобразователь с автоподстройкой выходного усилия электромагнитного формователя колбасных изделий / В.А. Каргин, А.В. Волгин, А.П. Моисеев, О.В. Логачёва. – Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (160). С. 176-180
88. Каргин, В.А. Электрический преобразователь электромагнитной ударной машины с конденсаторным питанием / В.А. Каргин, А.В. Волгин, А.П. Моисеев. – Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 43. – С.20-23
89. Клименко, Б.В. Форсированные электромагнитные системы [Текст] / Б.В. Клименко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
90. Коба, В.Г. Механизация и технология производства продукции животноводства / В.Г. Коба, Д.Н. Брагинец, В.Ф. Мурусидзе. – М.: Колос, 1999 – 528 с.
91. Конаков, А.П. Механизация раздачи кормов / А.П. Конаков, Ю.Н. Юдаев, Р.Б. Козин. – М.: ВО Агропромиздат, 1989.
92. Кондратьев, В.А. Проектирование исполнительных электромагнитных двигателей с использованием приемов математического моделирования [Текст]: Учеб. пособие. / В.А. Кондратьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 81 с.
93. Кононов, Б.В. Классификация и анализ устройств для разрушения сводов кормов в емкостях [Текст] / Б.В. Кононов, А.Г. Тарасов // Сборник «Механизация работ в животноводстве»; выпуск 43. – Саратов, 1975.
94. Коняев, А.Ю. Показатели эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов / Д.Н. Багин, А.Ю. Коняев // Промышленная энергетика. 2015. – № 4. – С. 20-24.
95. Коняев, А.Ю. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий // А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев, Е.Л. Швыдкий // Промышленная энергетика. 2017. – № 4. – С. 2-7.
96. Кочинев, Ю.Ю. Техника и планирование эксперимента / Ю.Ю. Кочинев, В.А. Серебренников. – Л.: ЛПИ, 1986. – 70 с.

97. Кублановский, Я.С. Тиристорные устройства [Текст]/ Я.С. Кублановский. – М.: Радио и связь, 1987. – 112 с.
98. Кулаковский, И.В. Машины и оборудование для приготовления кормов: Справочник: В 2 ч. Ч.1 / И.В. Кулаковский, Ф.С. Кирпичников, Е.И. Резник. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 285 с.
99. Лабунцов, В.А. Виды коммутации в вентильных преобразователях [Текст] / В.А. Лабунцов и др.// Электротехника. – 1969, №11. – С. 40–44.
100. Логачёва, О.В. Оценка надежности электроприводов с линейным перемещением рабочего органа в приводе шприцевателя колбасного фарша / О.В. Логачева, В.А. Каргин, А.Г. Закамсков // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. – С. 95-97.
101. Луковников, В.И. Электропривод колебательного движения [Текст] / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с., ил.
102. Львицын, А.В. Исследование влияния конструктивных факторов на показатели линейных электромагнитных двигателей с двумя рабочими зазорами / А.В. Львицын, К.М. Усанов, Г.Г. Угаров. – Саратов, СИМСХ им. М.И. Калинина, 1987 – 6 с. Деп. в Информэлектро, №882-ЭТ.
103. Львицын, А.В. Исследование энергетических характеристик приводных силовых электромагнитов цилиндрической структуры одного веса / А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах; вып.2. – Саратов, 1978. – С. 21–24.
104. Львицын, А.В. Обоснование конструкции и расчет параметров линейного электромагнитного двигателя сводообрушителя / А.В. Львицын, А.В. Волгин, В.А. Каргин, И.Ю. Лошкарев. – Аграрный научный журнал, № 8, 2015. – С. 48-50
105. Львицын, А.В. Разработка и исследование электромагнитных двигателей для прессового оборудования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Львицын. – Саратов, 1982. – 23 с.

106. Львицын, А.В. Электромагнитный пресс с устройством управления [Текст] / А.В. Львицын, К.М. Усанов, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин. – Саратов, СИМСХ им. М.И.Калинина, 1988. – 5 с. Деп. в Информэлектро, №963-ЭТ.
107. Любчик, М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов [Текст] / М.А. Любчик. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
108. Любчик, М.А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока / М.А. Любчик. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 224 с.
109. Малов, А.Т. Экспериментальные статические тяговые характеристики силового электромагнита постоянного тока с плоской формой воздушного зазора [Текст] / А.Т. Малов, Г.Г. Угаров // Электрические машины ударного действия. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1969. – С. 141–145.
110. Малов, А.Т. Электромагнитные молоты [Текст] / А.Т. Малов, Н.П. Ряшенцев, А.В. Носовец, Г.Г. Угаров. – Новосибирск: Наука, 1979. – 269 с.
111. Манжосов, В.К. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов [Текст] / В.К. Манжосов, Н.О. Лукутина, Т.О. Невенчанная. – Фрунзе: изд-во Илим, 1985. – 119 с.
112. Марадудин, А.М. Гидравлический и тепловой расчет ЛЭМД с самовентиляцией / А.М. Марадудин, В.А. Каргин, А.В. Перетятыко, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2016. – С. 151-154.
113. Марадудин, А.М. Гидравлический расчет ЛЭМД с принудительной вентиляцией / А.М. Марадудин, В.А. Каргин, А.В. Перетятыко, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2017. – С. 109-113.
114. Марадудин, А.М. Методика подбора системы охлаждения ЛЭМД / А.М. Марадудин, В.А. Каргин, А.В. Перетятыко., А.А. Леонтьев // В сборнике: Актуальные проблемы энергетики АПК // Материалы IX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. – С. 144-146

115. Марадудин, А.М. Оценка эффективности использования оребрения боковой поверхности корпуса в качестве системы охлаждения ЛЭМД / А.М. Марадудин, В.А. Каргин, А.В. Перетяtko, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2016. – С. 144-147.
116. Марадудин, А.М. Оценка эффективности теплоотдачи в охлаждающих каналах ЛЭМД с принудительной вентиляцией / А.М. Марадудин, В.А. Каргин, А.В. Перетяtko, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин» 2016. – С. 147-150.
117. Миклашевский, Е.П. Вибрационные строительные машины [Текст] / Е.П. Миклашевский, Н.Ф. Мельгунов. – М.: Профтехиздат, 1960. – 117 с.
118. Михеев, М.А., Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1979. – 216 с.
119. Моисеев, А.П. Влияние осевого канала на характеристики линейного электромагнитного двигателя / А.П. Моисеев, К.А. Айтамов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы V Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2014. – С.235-238.
120. Моисеев, А.П. Влияние режимных и конструктивных факторов на выходные показатели импульсного электромагнитного привода / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин // Наука в информационном пространстве: материалы VII Международной научно-практической конференции., 2011, Т.1. –Д.: Изд-во Биля К.О. – С.46-49.
121. Моисеев, А.П. Моделирование рабочего процесса в линейном электромагнитном двигателе шайбового кормораздаточного транспортера / Д.А. Вырыханов, А.П. Моисеев, В.А. Котенко // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы III Международной научно-практической конференции, Саратов, 2012. – С.178-181.

122. Моисеев, А.П. Обоснование механизма с самотормозящимся клиновым сопряжением в системе «линейный двигатель-рабочий орган» / А.П. Моисеев, К.А. Айтамов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы V Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2014. – С. 238-241.
123. Моисеев, А.П. Оценка выходных показателей электромагнитного привода тросошайбового транспортера / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов. Изд. СГТУ, Саратов 2011. – С 69-71.
124. Моисеев, А.П. Применение линейных электромагнитных приводов в шайбовых кормораздаточных транспортерах / А.П. Моисеев. – автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – ФГБОУ ВПО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, Саратов, 2011. – 16 с.
125. Моисеев, А.П. Реверсивный линейный шаговый электромагнитный двигатель привода конвейеров / А.П. Моисеев, В.А. Каргин, А.В. Волгин, Н.А. Артемов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2018. – С. 151-153.
126. Моисеев, А.П. Силовые характеристики линейного электромагнитного двигателя с конденсаторным питанием / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, И.Ю. Лошкарев, А.А Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI Международной научно-практической конференции, Саратов, 2015. – С. 181-185.
127. Моисеев, А.П. Силовые характеристики электромагнитного двигателя с осевым каналом / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, И.Ю. Лошкарев, А.А Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI Международной научно-практической конференции, Саратов, 2015. – С.179-181.
128. Моисеев, А.П. Система управления линейными электромагнитными двигателями / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI Международной научно-практической конференции, Саратов, 2015. – С. 24-26.

129. Моисеев, А.П. Устройство передачи механической энергии в схеме «ЛЭМД-шток-пуансон» / А.П. Моисеев, Д.А. Дебелый, С.А. Лаврентьев, Д.Е. Унаев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IX Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2018. С. 36-37.
130. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергии: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / В.И. Мошкин. – Новосибирск, 2018. – 32 с.
131. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: Монография [Текст] / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
132. Мошкин, В.И. Расчет основных параметров и анализ конструктивных схем электромагнитных ударных машин с помощью теоремы взаимности [Текст] / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Ударные процессы в технике. Тезисы Республиканского научно-технического семинара. – Фрунзе, 1988. – С. 86–87.
133. Найфельд, М.Р. Заземление, защитные меры безопасности [Текст] / М.Р. Найфельд. – М.: «Энергия», 1971.
134. Найфельд, М.Р. О сопротивлении повторных заземлений нулевого провода [Текст] / М.Р. Найфельд. – М.: «Энергетик», 1970, № 8.
135. Нейман, В.Ю. Линейные электромагнитные двигатели с многократным использованием магнитного потока [Текст] / В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров // Импульсный электромагнитный привод. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – С. 100–117.
136. Нейман, В.Ю. Основы построения и развитие теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями: автореф. дисс. ... д-ра. техн. наук / В.Ю. Нейман. – НГТУ, 2004. – 34 с.
137. Некрасов, С.С. Обработка материалов резанием: Учебное пособие / С.С. Некрасов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Колос, 1997. – 320 с.
138. Новожилов, Г.Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечномёрзлых грунтах [Текст] / Г.Ф. Новожилов. – Л.: Стройиздат, Ленинград. отд-ние, 1987. – 112 с.

139. Норрк Д, де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. Пер. с англ. – М., Мир, 2001. – 304 с.
140. Павлов, В.Б. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока [Текст] / В.Б. Павлов и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 284 с.
141. Петров, И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И.В. Петров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 246 с.
142. Потапов, Л.А. Comsol multiphysics: Моделирование электромеханических устройств: учеб. пособие / Л.А. Потапов, И.Ю. Бутарев – Брянск: БГТУ, 2011. – 112 с.
143. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер // Избранные труды. – М.: Наука, 2008.
144. Реверсивный линейный шаговый электромагнитный двигатель / А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин. – Патент на полезную модель RU179912 U1, МПК Н 02К 41/03. Опубл. 29.05.2018. Бюл. № 16
145. Руководство пользователя по программированию в CoDeSyS 2.3 – редакция RU 2.4, для CoDeSyS v 2.3.6х.
146. Ряшенцев, Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин [Текст] / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1987. – 160 с.
147. Ряшенцев, Н.П. Прессовое оборудование с линейными электромагнитными двигателями [Текст] / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. // Электромагнитные силовые импульсные системы: Сб. науч. тр. – Новосибирск: изд-во ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 3–13.
148. Ряшенцев, Н.П. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия [Текст] / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко, А.В. Фролов. – Новосибирск: Наука, 1970. – 259 с.
149. Ряшенцев, Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.

150. Ряшенцев, Н.П. Электромагнитный привод линейных машин [Текст] / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
151. Ряшенцев, Н.П. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями [Текст] / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Утаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
152. Самсонова, А.Н. Фруктовые и овощные соки / Самсонова, А.Н., Ушева, В.Б. // Техника и технология, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 2007. – 287 с.
153. Семенов, Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному [Текст] / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
154. Сиденко, В.М. Основы научных исследований / В.М. Сиденко, И.М. Грушко. – Харьков: Выш. шк., 1977. – 200 с.
155. Сильвестр П, Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 229 с.
156. Смоляницкий, Б.Н. Создание кольцевых пневмоударных машин для забивания в грунт стержней и бурения геологоразведочных скважин: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Б.Н. Смоляницкий. – Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1988. – 42 с.
157. Сотская, Х.Н. Обработка результатов лабораторных измерений / Х.Н. Сотская А.С. Кузнецов. – Минск: Выш. шк., 1971. – 40 с.
158. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / ред. совет : Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. - М. : Машиностроение, 1984.
159. Стась, И.Е. Дисперсные системы в природе и технике: Учеб. пособие / И.Е. Стась, А.С. Фомин. – Барнаул: БГУ, 2008. – С.217.
160. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики [Текст] / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа, 1995. – 415 с.
161. Труханов, В.М. Надежность в технике / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2005. – 598 с.

162. Туровский, П.С. Расчет, конструирование и создание электромагнитных генераторов силовых импульсов [Текст] / П.С. Туровский, А.В.Фролов. – Фрунзе: Изд-во АН Кирг.ССР, 1984. – 129 с.
163. Турчанинова, Т.А. Предотвращение сводообразования в силосах [Текст] / Т.А. Турчанинова, А.И. Либкин // Хлебопродукты, № 9, 2001.
164. Тютюкин, В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки налипшего оборудования от налипших материалов [Текст] / В.А. Тютюкин // Электротехника, №11, 2002.
165. Угаров, Г.Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин [Текст] / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996, №2. – С. 72–80.
166. Угаров, Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с интегрированной структурой / Г.Г. Угаров, А.Ф. Катаев, И.М. Хусаинов, В.Ю. Нейман // Электроприводы переменного тока: Тр. одиннадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург, Россия, 1998 г. – С. 40–43.
167. Угаров, Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Г.Г. Угаров. – Новосибирск, 1992. – 45 с.
168. Угаров, Г.Г. Схемы питания и управления линейными электромагнитными двигателями [Текст] / Г.Г. Угаров, А.В. Львицын, Г.А. Витмаер // Повышение эффективности использования электрического оборудования в сельском хозяйстве. – Саратов: СХИ, 1985. – С. 154–162.
169. Угаров, Г.Г. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии [Текст] / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Изв. ВУЗов. Электромеханика, 2002, №2 – С. 37–43.
170. Угаров, Г.Г. Энергетические показатели линейного электромагнитного двигателя в режиме энергопреобразования при постоянном потокоцеплении / Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин // Проблемы электротехники,

- электроэнергетики и электротехнологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции. Тольятти: ТГУ, 2004. – С.27-30
171. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро [Текст] / В.И. Радин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
172. Урьев, Н.Б. Пищевые дисперсные системы / Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник – М.: Агропромиздат, 2011. – 295 с.
173. Усаковский, В.М. Инерционные насосы [Текст] / Усаковский В.М. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
174. Усанов, К.М. Анализ устройств и конструктивная схема электромагнитной машины для переработки плодов на сок / К.М. Усанов, А.В. Волгин, Л.А. Лягина. – Аграрный научный журнал, №5, 2016. – С. 73-76.
175. Усанов, К.М. Влияние элементов магнитной системы на статические характеристики ЛЭМД в клипсаторе / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы III Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2012. – С. 265-268.
176. Усанов, К.М. Выбор захватного устройства в системе электромагнитный привод-рабочий орган / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2015. – С. 308-310.
177. Усанов, К.М. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 12, 2010. – С.67–70
178. Усанов, К.М. Импульсная машина с линейным электромагнитным двигателем как элемент энергосбережения в ряде технологий / К.М. Усанов, В.А. Каргин. – Научно-практический журнал «Энергосбережение в Саратовской области», №2 (36), июнь, 2009. – С.38–39.

179. Усанов, К.М. Импульсная система с линейным электромагнитным двигателем для интенсификации разгрузки бункеров / К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.А. Каргин. – Научное обозрение, № 6, 2012. – С.255-258.
180. Усанов, К.М. Импульсная электромагнитная система для интенсификации разгрузки бункеров [Текст] / К.М. Усанов, А.В. Волгин // Материалы Международн. научн-практ. конференции, посвящ. 70-летию со дня рожд. профессора А.Г. Рыбалко, ч.IV, ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ» 2006. – С. 81–85.
181. Усанов, К.М. Импульсная электромагнитная система для переработки плодового сырья на сок / К.М. Усанов, А.В. Волгин, А.А. Земков // Сборник научных трудов «Энергетический вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета» – Санкт-Петербург, 2010. – С.49.
182. Усанов, К.М. Импульсные электромагнитные двигатели в приводе оборудования пищевого производства / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко, С.М. Зубарев / Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы Международной научно-практической конференции – ФГОУ ВПО «Курская ГСХА» – Курск: Изд-во «Курской ГСХА», 2010. – С. 228-231.
183. Усанов, К.М. Импульсный электромагнитный привод машин с однонаправленным поступательным движением рабочего органа / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Кобы В.Г. – Саратов, 2011. – С. 239-241.
184. Усанов, К.М. Импульсный электромагнитный привод тросошайбового кормораздатчика с однонаправленным движением рабочего органа / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин. – Техника в сельском хозяйстве, №3 2011. – С. 14-16.
185. Усанов, К.М. Интенсификация охлаждения импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями [Текст] / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.С. Козлов // Техника в сельском хозяйстве, № 1, 2013. – С.16-17.
186. Усанов, К.М. Интенсификация охлаждения форсированных линейных электромагнитных двигателей за счет самовентиляции / К.М. Усанов, В.А. Каргин //

- Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы V международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2014. – С. 323-327.
187. Усанов, К.М. Интенсификация процесса теплопередачи в импульсных электромагнитных машинах / К.М. Усанов, В.А. Каргин, Т.А. Филимонова. – Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 9, 2010. – С. 75-78.
188. Усанов, К.М. Использование линейного электромагнитного двигателя для упаковки сельскохозяйственной продукции / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.А. Ивженко, А.В. Ивченко. – Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 1, 2012. – С. 22-23.
189. Усанов, К.М. Использование линейного электромагнитного привода в кормораздатчике / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Вавиловские чтения – 2007: материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: Научная книга, 2007. – С. 282-283.
190. Усанов, К.М. Исследование теплового процесса импульсного электромагнитного двигателя [Текст] / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев // Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 5, 2011. – С.18-20.
191. Усанов, К.М. Классификация и анализ устройств для переработки плодов на сок / К.М. Усанов, А.В. Волгин, А.А. Земков // Вавиловские чтения-2009: материалы Международной научно-практической конференции, ч.2, Саратов: ООО Издательство «КУБиК», 2009. – С.371.
192. Усанов, К.М. Классификация и анализ устройств для принудительного наполнения фаршем колбасных оболочек / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев / Технология здорового питания: материалы III Международной научно-практической конференции / Под ред. А.В. Голубева, ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2009. – С. 148-151.
193. Усанов, К.М. Классификация и анализ устройств для разрушения сводов сыпучих материалов в бункерах [Текст] / К.М. Усанов, А.В. Волгин, Ф.Э. Лаппи / Электротехника, электромеханика и электротехнологии. Материалы науч.-

техн. конференции с международным участием. / Под. ред. Н.И. Щурова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005 – с. 42–46.

194. Усанов, К.М. Компоновка линейного электромагнитного двигателя в оборудовании для шприцевания колбасного фарша / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев // Технология и продукты здорового питания: материалы IV Международной научно-практической конференции / Под ред. И.Л. Воротникова. – Саратов: Издательство «КУБиК» 2010. – С. 150-152.
195. Усанов, К.М. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях : монография / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2015. – 202 с.
196. Усанов, К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – 284 с.
197. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Патент на изобретение RU2366065, МПК H02K 41/03. Оpubл.27.08.2009, Бюл. № 24.
198. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Патент на полезную модель RU161875 U1, МПК H02K 41/03. Оpubл.10.05.2016, Бюл. № 13.
199. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, А.В. Волгин. – Патент на полезную модель RU59343, МПК H02K 41/03. Оpubл. 10.12.06, Бюл. №34.
200. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель в приводе комораздаточного транспортера / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, А.В. Волгин, А.А. Леонтьев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2016. – С. 240-241.

201. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель в приводе машин для прессования материалов / Усанов К.М., Львицын А.В., Волгин А.В. – Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2007. №3 – С. 61-62.
202. Усанов, К.М. Линейный шаговый электромагнитный двигатель с осевым каналом и протяжным устройством с зацеплением за шайбы / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Патент на изобретение RU2488212 С1, МПК H02K 41/03. Оpubл.20.07.2013 Бюл. № 20.
203. Усанов, К.М. Линейный электромагнитный двигатель с осевым каналом реверсивного исполнения / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Вавиловские чтения – 2009: материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: ИЦ «Наука», 2009. – С. 378-380.
204. Усанов, К.М. Исследование динамики электропривода переносных молотов / К.М. Усанов, А.В. Львицын / В сб. «Повышение эффективности использования электропривода в с.х. производстве». Тезисы Всесоюзной научно-технической конф. – Челябинск, 1989. – С. 20–21.
205. Усанов, К.М. Методика визуализации динамических характеристик электромагнитных импульсных машин / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин // Вавиловские чтения-2009: материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО Издательство «КУБиК», 2009. – С.373-376.
206. Усанов, К.М. Обоснование устройства передачи механической энергии в системе «линейный двигатель – рабочий орган» / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: материалы XV Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2009. – С. 563-566.
207. Усанов, К.М. Особенности энергопреобразований электромагнитной ударной машины с конденсаторным питанием / К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.А. Каргин / В сб. Инновационные технологии в обучении и производстве. Материалы III Всероссийской конференции. т.1. – Камышин, 2005. – С. 174–178.

208. Усанов, К.М. Оценка влияния конструктивных и режимных параметров на КПД электромагнитного привода сельскохозяйственного назначения / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции: Сборник научных докладов XV международной научно-практической конференции. – Тамбов.: Изд-во Першина Р.В., 2009. – С. 559–562.
209. Усанов, К.М. Оценка выходных показателей электромагнитной ударной машины с емкостным накопителем / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин // Вавиловские чтения-2008: материалы Международной научно-практической конференции, 3 ч. – Саратов: ИЦ «Наука», 2008. – С.217-219.
210. Усанов, К.М. Оценка геометрических размеров вентиляционных каналов линейных электромагнитных двигателей с самовентиляцией // К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Егин // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IV международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2013. – С. 330-333.
211. Усанов, К.М. Оценка надежности приводов машин с линейным перемещением рабочего органа / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев, А.В. Ивченко // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2010. – С. 339-343.
212. Усанов, К.М. Оценка надежности электроприводов с линейным перемещением рабочего органа / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев, А.В. Ивченко // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLIX Международной научно-практической конференции. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – С. 389-393.
213. Усанов, К.М. Оценка продолжительности погружения стержневых элементов в грунт электромагнитной ударной машиной / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, №3, 2008. – С. 70–71

214. Усанов, К.М. Оценка теплового потока электромагнитного двигателя импульсной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Научное обеспечение агропромышленного производства: Материалы Межд. науч.-практ. конф. – Курск: Изд-во Курск.гос.с.-х.ак., 2010. – С.231-236
215. Усанов, К.М. Оценка теплового состояния импульсной электромагнитной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, № 7, 2010. – С. 65–67.
216. Усанов, К.М. Оценка тепловых процессов в линейных электромагнитных двигателях с искусственным охлаждением / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.П. Моисеев. – Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, № 6, 2014. – С. 60-63.
217. Усанов, К.М. Оценка эффективности охлаждения линейных электромагнитных двигателей с самовентиляцией [Текст] / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.С. Козлов // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы III международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2012. – С.268-272.
218. Усанов, К.М. Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Труды Кубанского государственного аграрного университета, №3, 2008. – С.86-87.
219. Усанов, К.М. Перспективы применения импульсных электромагнитных машин в приводе оборудования для вязки колбасных батонов / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко. – Технология и продукты здорового питания: материалы III Международной научно-практической конференции / Под ред. А.В. Голубева; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2009. – С. 152-156.
220. Усанов, К.М. Преобразователь сигналов датчика предупредной скорости бойка импульсной ударной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин // Вестник Саратовского госагроуниверситета, 2007. – № 2. – С. 56–57.

221. Усанов, К.М. Пресс для отжима сока / К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.А. Каргин, А.П. Моисеев, Е.А. Четвериков. – Патент на полезную модель RU174620 U1, МПК В 02В 9/06. Оpubл. 23.10.2017, Бюл. № 30.
222. Усанов, К.М. Принципы построения устройств питания и управления линейными электромагнитными двигателями стационарных кормораздатчиков / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Вавиловские чтения-2008: материалы Международной научно-практической конференции, 3ч. – Саратов: ИЦ «Наука», 2008. – С.339-340.
223. Усанов, К.М. Рабочий процесс клипсатора с линейным электромагнитным двигателем / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко. – Энергетический Вестник Санкт-Петербургского ГАУ: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2010. – С. 58-63.
224. Усанов, К.М. Расчет статических тяговых характеристик электромагнитной машины ударного действия с использованием ЭВМ / К.М. Усанов, В.А. Каргин // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, т.1. –Камышин, 2005. – С. 181.
225. Усанов, К.М. Расчет тепловых процессов импульсной электромагнитной машины для шприцевания колбасного фарша / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев, Е.В. Глухарев // Инновации, наука и образование XXI века: Материалы международной научно-практической конференции: Саратов: Изд-во «КУ-БиК», 2010. – С. 196-199.
226. Усанов, К.М. Расчет энергетических характеристик импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко, Е.В. Глухарев // Инновации, наука и образование XXI века: материалы Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУ-БиК», 2010. – С. 200-203.
227. Усанов, К.М. Реверсивный линейный электромагнитный двигатель с осевым каналом / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Патент на изобретение RU2440661, МПК H02K 41/03. Оpubл.20.01.2012, Бюл. № 2.

228. Усанов, К.М. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт / К.М. Усанов, В.А. Каргин. – Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, № 3, 2005, – С. 59-61.
229. Усанов, К.М. Силовые электромеханические импульсные преобразователи электромагнитного типа для ударных воздействий на среду [Текст] / К.М. Усанов, Г.Г. Угаров, А.В. Волгин, В.А. Каргин / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика //Десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3х Т., М.: МЭИ, 2004 Т.2 – С. 70–71.
230. Усанов, К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами / К.М. Усанов. – автореферат диссертации д.т.н. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2009. – 32 с.
231. Усанов, К.М. Способы интенсификации охлаждения линейных электромагнитных двигателей / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Наука в информационном пространстве: материалы VII Международная научно практической конференции, 2011, Т.1. – Д.: Изд-во Биля К.О. – С. 42-45.
232. Усанов, К.М. Тепловой расчет линейного электромагнитного двигателя ударных машин / К.М. Усанов, В.А. Каргин, Т.А. Филимонова // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 288-291.
233. Усанов, К.М. Тепловой расчет электромагнитного двигателя импульсной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин, Т.А. Филимонова. – Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 7, 2011. – С.16–18
234. Усанов, К.М. Технические средства автоматики: Учебное пособие / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.Я. Змеев, А.П. Моисеев, А.В. Волгин. – ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2014. – 188 с.
235. Усанов, К.М. Тиристорный преобразователь для управления линейным импульсным электрическим двигателем с электромагнитным узлом статического нагружения якоря [Текст] / К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.И. Мошкин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, 2005, № 4. – С.51–54.

236. Усанов, К.М. Устройство для образования и наложения скрепок на концы рукавных оболочек или пакетов / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко. – Патент на полезную модель RU151714U1, МПК В65В 51/05. Оpubл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
237. Усанов, К.М. Формирование тяговой характеристики электромагнитного двигателя для шприцевания колбасного фарша / К.М. Усанов, В.А. Каргин, С.М. Зубарев // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 285-287
238. Усанов, К.М. Экспериментальная оценка силовых показателей электропривода тросошайбового транспортера с линейным электромагнитным двигателем / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.П. Моисеев, Е.А. Четвериков. – Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, №6, 2015. – С. 69-72.
239. Усанов, К.М. Экспериментальная оценка тягового усилия линейного электромагнитного двигателя в нестационарном режиме / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, А.В. Волгин // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции, Саратов, 2011. – С.283-285
240. Усанов, К.М. Экспериментальные исследования рабочих процессов силовой импульсной системы с ЛЭМД привода тросошайбовых (штанго-дисковых) кормораздатчиков / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург – Пушкин, 2010. – С.53-57.
241. Усанов, К.М. Электрические преобразователи с емкостными накопителями энергии для управления дискретными электромагнитными машинами / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Перетятко // Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VII Международной научно-практической конференции. Под ред. Ф.К. Абдразакова; кафедра

- «Строительство и теплогазоснабжение», ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, 2016. – С.254-258.
242. Усанов, К.М. Электрический преобразователь с емкостным накопителем энергии для питания электромагнитной ударной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Материалы конференции, посвященной 119-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова, Саратов: СГАУ, 2006. – С. 81–85
 243. Усанов, К.М. Электрический преобразователь электромагнитной ударной машины / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вавиловские чтения-2009: Материалы Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ООО Издательство «КУБиК», 2009. – С.376–378
 244. Усанов, К.М. Электромагнитная машина ударного действия для погружения в грунт продольно-неустойчивых стержневых элементов / К.М. Усанов, В.А. Каргин. – Шестой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций: в 2 ч. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2011. Ч.1. – С.237-238
 245. Усанов, К.М. Электромагнитная ударная машина для предотвращения зависаний муки в металлических бункерах [Текст] / Усанов К.М., Угаров Г.Г., Трубенкова И.В., Иняев К.Г., Волгин А.В./ В сб. Прогрессивные технологии в обучении и производстве. Материалы II Всероссийской конференции. – Камышин, 2003. – С. 365–366
 246. Усанов, К.М. Электромагнитные машины с осевым каналом в процессах и технологиях АПК / К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Механизация и электрификация сельского хозяйства, №5, 2008. – С. 31-33.
 247. Усанов, К.М. Электромагнитный привод машин для наложения металлических скоб на упаковку / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Ивченко // Достижения науки – агропромышленному производству: Материалы LI международной научно-практической конференции, ч.V. – Челябинск: ЧГАА, 2012. – С. 184-186.
 248. Усанов, К.М. Энергетические показатели импульсного электромагнитного привода для забивания в грунт стержневых элементов / К.М. Усанов, В.А. Каргин,

- А.В. Волгин // Вавиловские чтения – 2007: Материалы конференции. – Саратов: Научная книга, 2007. – С.280-281
249. Устройство ударного действия для забивания в грунт стержневых элементов / Г.Г. Угаров, К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.В. Волгин. – Патент на полезную модель RU40331U1, МПК E02D 7/02. Оpubл.10.09.2004. Бюл. № 25
 250. Устройство ударного действия для разрушения сводов в бункерах / К.М. Усанов, А.П. Моисеев, А.В. Волгин, В.А. Каргин. – Патент на полезную модель RU162786U1, МПК B25D 11/04. Оpubл. 27.06.2016. Бюл. № 18
 251. Федонин, В.Н. Определение оптимальных геометрических соотношений цилиндрических электромагнитов с двумя рабочими зазорами [Текст] / В.Н. Федонин, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын, В.Ю. Кожевников // Электрификация сельскохозяйственного производства. – Саратов, 1979, Вып. 124. – С.77–85.
 252. Федулов, А.И. Анализ показателей гидроударных устройств [Текст] / А.И. Федулов, А.П. Архипенко // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых, 1986, №4 – С. 58 – 69.
 253. Филиппов, И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – М.: Энергия, 1974. – 384 с.
 254. Филиппов, И.Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст]: Учеб. пособие для вузов / И.Ф. Филиппов. – Л. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
 255. Финни, Д.В. Введение в теорию планирования экспериментов / Д.В. Финни – М.: Наука, 1970. – 297 с.
 256. Фридман, Б.Э. Переходные процессы при программируемом разряде ёмкостного накопителя энергии / Б.Э. Фридман // Электричество, 1989, №12. – С. 36–41.
 257. Фридман, Б.Э. Формирование импульса тока при программируемом разряде ёмкостного накопителя энергии / Б.Э. Фридман // Электричество, 1999, №6. – С. 42–48.
 258. Фризен В.Э. Методы расчета электрических и магнитных полей: учебный комплект / В.Э. Фризен, И.В. Черных, С.А. Бычков, Ф.Е. Тарасов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 176 с.

259. Черноиванов, В.И. и др. Новые технологии и оборудование для технического перевооружения и строительства свиноводческих ферм и комплексов. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 264 с.
260. Черных, И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / Черных И.В. Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
261. Чиженко, И.М. Зарядные устройства емкостных накопителей энергии / И.М. Чиженко, Г.С. Бердинских. – Киев: Наукова думка, 1980. – 152 с.
262. Шайдуров, В.В. Многосеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров. – М., Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1989. – 288 с.
263. Шмелев В.Е. Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных.
<http://matlab.exponenta.ru/pde/book1/index.php>.
264. Шопен, Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики: Учебник для вузов [Текст] / Шопен, Л.В. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 586 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Листинг программы расчетов собственной индуктивности обмотки ЛЭМД

```

% Расчет эксплуатационных параметров линейного электромагнитного
% электродвигателя
clc
clear
% Задаем параметры конструкции электродвигателя-----
r1=0.02; %0.012; % Радиус внутреннего канала
r2=0.04; % Радиус якоря
r3=0.075; % Радиус внутреннего статора
r4=0.095; % Внешний радиус статора
v1=0.0225; % Толщина нижнего основания статора
v2=0; %0.0225; % Высота стопора
v3=0.195; % Высота обмотки статора
v4=0.015; % Высота шляпки якоря
a=0; %45; % Угол конуса стопора
Dpr=0.002; % Диаметр провода
Kz=0.7; % Коэффициент заполнения окна обмотки
% Определяем расчетные параметры по току -----
I=[0:10:100]; % Задаем значения токов при расчетах
Ni=size(I);
% Определяем расчетные параметры по рабочему ходу -----
dr=[0:0.01:0.1]; % Задаем значение рабочего зазора при расчетах
Nd=size(dr);
% Задаем физические свойства материалов двигателя-----
Pst=6700; % Плотность стали магнитопровода
Pmed=8930; % Плотность меди
% Расчет индуктивности обмотки возбуждения электродвигателя-----
model=mphload('LEMD1.mph'); % Считываем расчетный файл Comsol
L=0; % Формируем отчетную матрицу индуктивности
F=0; % Формируем отчетную матрицу усилий
% Заносим в файл Comsol параметры моделей-----
model.param.set('r1', r1*k);
model.param.set('r2', r2*k);
model.param.set('r3', r3*k);
model.param.set('r4', r4*k);
model.param.set('v1', v1*k);
model.param.set('v2', v2*k);
model.param.set('v3', v3*k);
model.param.set('v4', v4*k);
model.param.set('a', a);
% Формируем координаты расчетных точек для определения индуктивности
% обмотки
r0=0:Dpr/10:(r2*k+(r3*k-r2*k)/2);
z0=v1:Dpr:v1*k+v3*k;
[r, z]=meshgrid(r0,z0);
xx=[r(:),z(:)]';
% Формируем цикл расчетов
for j=1:Ni(1, 2)
    if I(j)>=0.001

```

```

        J=I(j)*Kz/(pi*(Dpr/2)^2); % Плотность тока
    else
        J=0.001*Kz/(pi*(Dpr/2)^2); % Минимальная плотность тока
    end;
    model.param.set('J', J);
    for i=1:Nd(1, 2)
        model.param.set('d', dr(i)); % Задаем рабочий зазор
        model.sol('sol1').run; % Рассчитываем файл
        W=sum(mphinterp(model,'mf.Bz*2*pi*r','coord',xx).*(Dpr/10));
        L(j, i)=(W*round((r3-r2)/Dpr))/(pi*J*(Dpr/2)^2);
        F(j, i)=-1*mpghglobal(model,{'mf.Forcez_0'});
        Ni(1, 2)
        j
        Nd(1, 2)
        i
    end;
end;
figure
hold on
for i=1:Ni(1, 2)
    plot(dr, F(i, :));
end;
hold off

```

Расчетные значения индуктивности ЛЭМД

Табл.П.2.1 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0$

L, Гн	δ , мм										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,482763	0,482763	0,308337	0,239321	0,201114	0,176569	0,158706	0,145235	0,134566	0,12568	0,118193
10	0,263886	0,263886	0,242933	0,222075	0,201437	0,181938	0,164515	0,150483	0,139176	0,129732	0,121779
20	0,148905	0,148905	0,144503	0,14005	0,135717	0,131532	0,127346	0,12333	0,119403	0,115446	0,111575
30	0,104783	0,104783	0,102989	0,101193	0,099353	0,097628	0,095865	0,094183	0,092541	0,090888	0,089243
40	0,081443	0,081443	0,080464	0,07949	0,078473	0,077475	0,07647	0,07549	0,074533	0,073592	0,072641
50	0,067087	0,067087	0,066466	0,065799	0,06514	0,064483	0,063792	0,063143	0,062513	0,061851	0,06121
60	0,057339	0,057339	0,05691	0,056404	0,055903	0,055457	0,05499	0,054513	0,054024	0,053557	0,053064
70	0,050292	0,050292	0,049964	0,049598	0,049231	0,048857	0,048503	0,048124	0,047766	0,047385	0,047008
80	0,044937	0,044937	0,044645	0,044354	0,044072	0,04379	0,043498	0,043222	0,042916	0,042619	0,042312
90	0,040704	0,040709	0,040471	0,040235	0,040004	0,039774	0,039537	0,039301	0,039061	0,038816	0,038563
100	0,037285	0,037285	0,037094	0,036897	0,036704	0,036513	0,036315	0,036119	0,035918	0,035713	0,035499

Табл.П.2.2 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,05$

L, Гн	δ , мм										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,482813	0,118519	0,076386	0,054857	0,040268	0,029677	0,022024	0,016729	0,013361	0,011529	0,010789
10	0,263592	0,122127	0,077793	0,055531	0,040594	0,029824	0,022084	0,016751	0,013369	0,011534	0,010793
20	0,148643	0,111664	0,077742	0,055657	0,040688	0,029873	0,02211	0,016761	0,013373	0,011536	0,010795
30	0,104642	0,089213	0,072443	0,055231	0,040701	0,029911	0,022131	0,01677	0,013377	0,011538	0,010797
40	0,081334	0,072574	0,063006	0,052141	0,040365	0,029911	0,022146	0,01678	0,01338	0,01154	0,010798
50	0,06699	0,061141	0,054523	0,047299	0,038862	0,029788	0,022149	0,016788	0,013383	0,011541	0,010799
60	0,057293	0,053003	0,04796	0,042496	0,036456	0,029256	0,022135	0,016793	0,013387	0,011542	0,0108
70	0,050243	0,046955	0,042913	0,038479	0,033375	0,028296	0,022036	0,016791	0,01339	0,011543	0,010801
80	0,0449	0,042267	0,038942	0,035222	0,031279	0,026994	0,021792	0,016789	0,013394	0,011544	0,010801
90	0,040665	0,038524	0,035729	0,032551	0,029168	0,025591	0,021394	0,016769	0,013392	0,011545	0,010802
100	0,037257	0,035464	0,033076	0,03032	0,027376	0,024281	0,020854	0,016716	0,013396	0,011546	0,010802

Табл.П.2.3 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,1$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,481687	0,481687	0,307993	0,239244	0,201161	0,176328	0,158589	0,14508	0,134571	0,125705	0,11819
10	0,262185	0,262185	0,241727	0,221198	0,201084	0,181572	0,164374	0,150324	0,139192	0,129773	0,121788
20	0,147692	0,147692	0,143553	0,139175	0,134903	0,130727	0,126627	0,122666	0,11888	0,114995	0,111154
30	0,103998	0,103998	0,102209	0,100447	0,098644	0,09693	0,095215	0,093546	0,091964	0,090333	0,088716
40	0,080829	0,080829	0,079892	0,078861	0,077919	0,076933	0,075939	0,07497	0,07405	0,073099	0,072163
50	0,066627	0,066627	0,065998	0,065317	0,06464	0,064002	0,063363	0,062697	0,062073	0,061454	0,060804
60	0,056969	0,056969	0,056516	0,056043	0,05557	0,055088	0,054609	0,054149	0,053672	0,053199	0,05272
70	0,049986	0,049986	0,049628	0,049267	0,048908	0,048524	0,048159	0,04781	0,047451	0,047082	0,04671
80	0,04465	0,04465	0,044353	0,044072	0,043788	0,043523	0,043221	0,042932	0,042643	0,042352	0,042049
90	0,040474	0,040474	0,040221	0,039979	0,039755	0,039527	0,039291	0,039055	0,03882	0,038579	0,03833
100	0,037076	0,037076	0,036873	0,036672	0,036482	0,036294	0,036097	0,035899	0,035704	0,035501	0,035289

Табл.П.2.4 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,15$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,47985	0,118466	0,076395	0,054866	0,040271	0,029681	0,022028	0,016729	0,013354	0,011528	0,010788
10	0,259683	0,122106	0,077824	0,055551	0,040603	0,029831	0,022089	0,016751	0,013362	0,011533	0,010792
20	0,146223	0,110744	0,077721	0,055673	0,040698	0,02988	0,022115	0,016762	0,013365	0,011535	0,010794
30	0,102941	0,08803	0,071892	0,05514	0,040706	0,029918	0,022136	0,01677	0,013369	0,011537	0,010796
40	0,080121	0,071526	0,06224	0,051773	0,040276	0,029914	0,022151	0,016781	0,013372	0,011539	0,010797
50	0,066003	0,060246	0,053793	0,046779	0,038647	0,029767	0,022156	0,016789	0,013376	0,01154	0,010798
60	0,056454	0,052242	0,047291	0,04197	0,036122	0,029169	0,022135	0,016793	0,01338	0,011541	0,010799
70	0,049563	0,046285	0,042332	0,037994	0,033391	0,028125	0,022015	0,016793	0,013384	0,011542	0,010799
80	0,044261	0,041675	0,038425	0,034784	0,030918	0,026768	0,021745	0,016787	0,013386	0,011543	0,0108
90	0,040109	0,037997	0,035261	0,03215	0,02884	0,025356	0,021306	0,016766	0,013388	0,011544	0,0108
100	0,036773	0,034992	0,032655	0,029954	0,02707	0,024048	0,020735	0,016704	0,013389	0,011545	0,0108

Табл.П.2.5 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,2$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,476479	0,476479	0,305803	0,238026	0,199921	0,175831	0,1582	0,14486	0,134325	0,125516	0,118034
10	0,25613	0,25613	0,236952	0,217643	0,198557	0,180497	0,163867	0,150095	0,138974	0,129623	0,121679
20	0,144131	0,144131	0,140007	0,135902	0,131874	0,128033	0,124187	0,120493	0,116914	0,113285	0,109672
30	0,10141	0,10141	0,099724	0,098033	0,096296	0,09468	0,093003	0,091445	0,089938	0,088401	0,086868
40	0,078912	0,078912	0,077979	0,076988	0,076002	0,075073	0,074152	0,073203	0,072334	0,071434	0,070538
50	0,065034	0,065034	0,064412	0,063794	0,063141	0,062537	0,061869	0,061272	0,060657	0,060043	0,059429
60	0,055643	0,055643	0,055215	0,054715	0,054274	0,053837	0,053363	0,05289	0,052451	0,052008	0,05154
70	0,048856	0,048856	0,048501	0,04816	0,047809	0,047464	0,047084	0,046736	0,046401	0,04604	0,045681
80	0,043693	0,043692	0,04338	0,043102	0,042818	0,042555	0,042275	0,04199	0,041717	0,041434	0,041145
90	0,039612	0,039612	0,039392	0,039134	0,038907	0,038682	0,038455	0,038225	0,038	0,037764	0,037525
100	0,03631	0,03631	0,036129	0,035885	0,035731	0,035545	0,035356	0,035154	0,034968	0,034772	0,034574

Табл.П.2.6 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,25$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,470112	0,117663	0,075971	0,054604	0,040102	0,029572	0,021956	0,016687	0,013348	0,011522	0,010783
10	0,250352	0,121342	0,07745	0,05532	0,040454	0,029735	0,022024	0,016712	0,013356	0,011527	0,010787
20	0,140768	0,108101	0,077166	0,055422	0,040542	0,029784	0,022051	0,016724	0,01336	0,011529	0,010789
30	0,09909	0,085111	0,070265	0,054595	0,040527	0,029813	0,022072	0,016732	0,013364	0,011531	0,010791
40	0,077143	0,069037	0,060333	0,050696	0,039892	0,029799	0,02208	0,016742	0,013367	0,011533	0,010792
50	0,063579	0,05814	0,052033	0,045472	0,037974	0,029561	0,022083	0,016748	0,013371	0,011534	0,010793
60	0,054476	0,050455	0,045774	0,040729	0,035259	0,028826	0,022046	0,016752	0,013375	0,011535	0,010794
70	0,047839	0,044728	0,040975	0,036852	0,032497	0,027631	0,021879	0,01675	0,013378	0,011536	0,010795
80	0,042831	0,040316	0,037216	0,033757	0,030094	0,026191	0,021548	0,016745	0,01338	0,011538	0,010795
90	0,038856	0,036789	0,034181	0,031219	0,028071	0,024774	0,021043	0,016704	0,013383	0,011539	0,010796
100	0,035624	0,033911	0,031677	0,029106	0,026362	0,023493	0,020402	0,016628	0,013382	0,011539	0,010796

Табл.П.2.7 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,3$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,463998	0,463998	0,301291	0,235256	0,198402	0,174722	0,157407	0,143895	0,133735	0,125031	0,117644
10	0,244026	0,244026	0,228218	0,210856	0,194115	0,177938	0,162663	0,149028	0,138391	0,129187	0,121354
20	0,137078	0,137078	0,134146	0,130359	0,1267	0,123222	0,119813	0,116381	0,11325	0,110019	0,106802
30	0,096481	0,096481	0,095484	0,093874	0,092295	0,090788	0,089287	0,087778	0,086423	0,085016	0,08363
40	0,075219	0,075219	0,074706	0,073784	0,072842	0,072007	0,071103	0,070223	0,069425	0,068583	0,067745
50	0,06208	0,06208	0,061798	0,061183	0,060547	0,059998	0,059383	0,058748	0,058245	0,057664	0,057067
60	0,05322	0,05322	0,053024	0,052571	0,052129	0,051703	0,051272	0,05083	0,050395	0,049985	0,049537
70	0,046774	0,046774	0,046634	0,046267	0,045929	0,045604	0,045296	0,044936	0,044611	0,044278	0,043941
80	0,041871	0,041871	0,04178	0,041483	0,041239	0,040971	0,040684	0,040419	0,040151	0,039888	0,039615
90	0,037998	0,037998	0,037936	0,03771	0,037484	0,037271	0,03706	0,036832	0,036615	0,036392	0,036167
100	0,034969	0,034969	0,034831	0,034664	0,034463	0,034286	0,034107	0,033915	0,033735	0,033544	0,033353

Табл.П.2.8 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,35$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, A	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,456708	0,116775	0,075612	0,054379	0,039952	0,02947	0,021891	0,016646	0,013335	0,01151	0,010774
10	0,236723	0,120511	0,077163	0,055136	0,040327	0,029645	0,021964	0,016673	0,013344	0,011514	0,010778
20	0,132866	0,104059	0,076427	0,055219	0,040411	0,029696	0,021991	0,016686	0,013348	0,011517	0,01078
30	0,093602	0,080919	0,067832	0,05379	0,040369	0,029719	0,022013	0,016693	0,013353	0,011519	0,010782
40	0,072984	0,065499	0,057593	0,049035	0,03932	0,029674	0,02202	0,016704	0,013356	0,011521	0,010783
50	0,060286	0,055205	0,049608	0,043595	0,036924	0,029242	0,022015	0,016708	0,01336	0,011522	0,010784
60	0,051743	0,047932	0,043597	0,038949	0,033987	0,028276	0,021931	0,01671	0,013364	0,011523	0,010785
70	0,045521	0,042555	0,039074	0,035248	0,031239	0,026868	0,021677	0,016707	0,013366	0,011524	0,010785
80	0,040802	0,038401	0,035526	0,032311	0,028914	0,025348	0,021223	0,016686	0,013369	0,011526	0,010786
90	0,037069	0,035092	0,032657	0,029909	0,026988	0,023933	0,020604	0,016626	0,01337	0,011526	0,010786
100	0,034054	0,03239	0,030314	0,027917	0,02536	0,022705	0,019894	0,016515	0,01337	0,011527	0,010787

Табл.П.2.9 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,4$

L, Гн	δ , мм										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,447774	0,447774	0,294302	0,230746	0,195544	0,172211	0,155057	0,142707	0,132658	0,124037	0,116818
10	0,227865	0,227865	0,214913	0,199866	0,186055	0,172471	0,158883	0,147421	0,13721	0,128204	0,120594
20	0,127813	0,127813	0,125529	0,12207	0,119018	0,115947	0,112688	0,110185	0,107492	0,10471	0,10202
30	0,090067	0,090067	0,089392	0,087812	0,086508	0,08513	0,083577	0,08252	0,081292	0,080033	0,078826
40	0,070356	0,070356	0,070011	0,069112	0,068347	0,067558	0,066581	0,065996	0,065253	0,064467	0,063735
50	0,058198	0,058198	0,058066	0,057432	0,056907	0,05637	0,055674	0,055298	0,05478	0,054247	0,053711
60	0,049995	0,049995	0,049926	0,049436	0,04906	0,048649	0,048146	0,047874	0,047474	0,047079	0,046688
70	0,044063	0,044063	0,043988	0,043636	0,043321	0,043017	0,042602	0,042399	0,042093	0,041776	0,04147
80	0,039511	0,039511	0,039519	0,039186	0,038947	0,038704	0,038363	0,038204	0,037964	0,037698	0,03745
90	0,03594	0,03594	0,035959	0,03568	0,035498	0,03529	0,034969	0,034876	0,03467	0,034453	0,034247
100	0,033069	0,033069	0,033063	0,03283	0,032665	0,03249	0,03224	0,03217	0,031998	0,031811	0,031636

Табл.П.2.10 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,45$

L, Гн	δ , мм										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,442472	0,116688	0,075824	0,054574	0,040084	0,029552	0,021929	0,016647	0,013262	0,011478	0,010758
10	0,219971	0,120497	0,077487	0,05539	0,040489	0,02974	0,022007	0,016676	0,013272	0,011483	0,010762
20	0,123337	0,098934	0,075573	0,055423	0,040577	0,029799	0,022036	0,016689	0,013277	0,011485	0,010764
30	0,087042	0,075871	0,064717	0,052705	0,040386	0,029819	0,022062	0,016697	0,013281	0,011488	0,010766
40	0,068031	0,061265	0,054289	0,04692	0,038567	0,029676	0,02207	0,016711	0,013284	0,011489	0,010767
50	0,056355	0,051696	0,046627	0,041309	0,035543	0,028889	0,02203	0,016716	0,013289	0,011491	0,010768
60	0,048504	0,044956	0,041034	0,036848	0,032398	0,027507	0,021836	0,016717	0,013292	0,011492	0,010769
70	0,042773	0,039976	0,036813	0,033349	0,029716	0,025875	0,021416	0,016706	0,013293	0,011493	0,01077
80	0,038429	0,036142	0,033507	0,030586	0,027507	0,024306	0,020774	0,01665	0,013295	0,011494	0,01077
90	0,034989	0,033086	0,030871	0,028346	0,025696	0,022933	0,020017	0,016534	0,013295	0,011495	0,010771
100	0,03222	0,030597	0,02869	0,026505	0,024172	0,021754	0,019244	0,01636	0,013292	0,011496	0,010771

Табл.П.2.11 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,5$

L, Гн	δ , мм										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,431174	0,431174	0,280817	0,222148	0,188453	0,167016	0,151188	0,138937	0,129265	0,12113	0,114186
10	0,208376	0,208376	0,193626	0,182042	0,170996	0,160954	0,151251	0,141667	0,132978	0,124997	0,11786
20	0,116859	0,116859	0,112533	0,109753	0,107102	0,10468	0,102334	0,100047	0,097906	0,095776	0,093677
30	0,082619	0,082619	0,080323	0,079051	0,07782	0,076683	0,075575	0,074484	0,07346	0,07242	0,071435
40	0,064649	0,064649	0,063154	0,062409	0,061654	0,060986	0,060297	0,059622	0,058987	0,05835	0,057714
50	0,053715	0,053715	0,05257	0,052032	0,05149	0,051045	0,050571	0,050104	0,049648	0,049143	0,048738
60	0,046289	0,046289	0,045388	0,044972	0,044581	0,044218	0,043857	0,043507	0,043168	0,042826	0,042476
70	0,040914	0,040914	0,040116	0,039805	0,039494	0,039219	0,03893	0,038649	0,038383	0,038114	0,03785
80	0,036825	0,036825	0,036153	0,035882	0,035634	0,035405	0,035167	0,03494	0,03472	0,034504	0,034279
90	0,033558	0,033558	0,033042	0,032766	0,032548	0,032352	0,03219	0,031999	0,031795	0,031601	0,031443
100	0,030974	0,030974	0,030485	0,030305	0,030075	0,029917	0,029743	0,029574	0,029419	0,029294	0,029134

Табл.П.2.12 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,55$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,418405	0,115265	0,075301	0,054258	0,039872	0,029394	0,021818	0,016573	0,013203	0,011436	0,010735
10	0,195269	0,118776	0,077117	0,05518	0,040335	0,029613	0,021912	0,016608	0,013215	0,011441	0,010738
20	0,109708	0,090345	0,072295	0,054924	0,040402	0,029673	0,021941	0,016622	0,013221	0,011444	0,010741
30	0,077753	0,068421	0,059469	0,049961	0,039584	0,029656	0,021965	0,016634	0,013226	0,011446	0,010742
40	0,061017	0,055253	0,049441	0,043328	0,036628	0,029134	0,021954	0,016643	0,013229	0,011448	0,010744
50	0,050779	0,04671	0,042437	0,0379	0,033098	0,027767	0,021812	0,016645	0,013234	0,011449	0,010745
60	0,043886	0,040732	0,037385	0,033777	0,029989	0,025968	0,021365	0,016636	0,013236	0,01145	0,010746
70	0,03886	0,036343	0,033619	0,030628	0,02748	0,024238	0,020662	0,016579	0,013237	0,011452	0,010746
80	0,035098	0,032965	0,03069	0,028163	0,025497	0,02273	0,019831	0,016441	0,013236	0,011453	0,010747
90	0,032031	0,030279	0,02835	0,026169	0,023859	0,021459	0,018998	0,016224	0,013232	0,011454	0,010747
100	0,029623	0,028066	0,026437	0,024522	0,022483	0,020397	0,018246	0,015932	0,013223	0,011454	0,010747

Табл.П.2.13 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,6$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,403533	0,403533	0,266011	0,212481	0,18209	0,161961	0,147114	0,135579	0,126262	0,118529	0,111948
10	0,180747	0,180747	0,168387	0,15999	0,152352	0,14536	0,138654	0,132332	0,126188	0,120192	0,114474
20	0,101698	0,101698	0,097567	0,095394	0,09341	0,091556	0,089791	0,088075	0,086461	0,084877	0,083346
30	0,072234	0,072234	0,069993	0,068926	0,067965	0,067064	0,066173	0,065313	0,064486	0,063694	0,062908
40	0,056958	0,056958	0,055364	0,0547	0,054086	0,053515	0,052968	0,052432	0,051906	0,051388	0,05088
50	0,047548	0,047548	0,04628	0,045861	0,045413	0,045001	0,044605	0,044213	0,043848	0,043476	0,043116
60	0,041197	0,041197	0,040203	0,039847	0,03948	0,039171	0,03888	0,038569	0,038282	0,037992	0,03772
70	0,036629	0,036629	0,035741	0,035461	0,035183	0,034933	0,034661	0,034446	0,034207	0,033983	0,033753
80	0,033082	0,033082	0,032367	0,032097	0,031898	0,031683	0,031467	0,031281	0,031078	0,030895	0,030704
90	0,030353	0,030353	0,029703	0,029471	0,029264	0,029095	0,028943	0,028732	0,028578	0,028447	0,028285
100	0,028127	0,028127	0,027592	0,02735	0,027172	0,027023	0,026858	0,026706	0,026566	0,026425	0,026288

Табл.П.2.14 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,65$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,378222	0,110611	0,072908	0,052745	0,03887	0,028729	0,021396	0,016319	0,013108	0,011379	0,0107
10	0,16115	0,110845	0,074859	0,053802	0,039422	0,028998	0,021515	0,016364	0,013123	0,011385	0,010704
20	0,091109	0,076987	0,064666	0,051928	0,039366	0,02904	0,021545	0,01638	0,01313	0,011388	0,010707
30	0,065095	0,057908	0,051285	0,044397	0,036875	0,028792	0,021552	0,01639	0,013134	0,01139	0,010708
40	0,051609	0,046917	0,042463	0,037791	0,032824	0,027354	0,021432	0,016396	0,013139	0,011392	0,01071
50	0,043253	0,039885	0,036541	0,032993	0,029279	0,025332	0,020909	0,016381	0,013142	0,011393	0,010711
60	0,037679	0,034978	0,032354	0,029498	0,026504	0,023407	0,020063	0,016294	0,013144	0,011395	0,010711
70	0,033631	0,031412	0,029251	0,026881	0,024365	0,021803	0,019126	0,016102	0,013143	0,011396	0,010712
80	0,030496	0,028663	0,026855	0,024832	0,022696	0,020497	0,018233	0,0158	0,013138	0,011397	0,010712
90	0,028113	0,026482	0,024909	0,023188	0,021332	0,019421	0,017476	0,01543	0,013114	0,011398	0,010713
100	0,02615	0,024683	0,02336	0,021835	0,020208	0,018528	0,016814	0,015062	0,013069	0,011399	0,010713

Табл.П.2.15 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,7$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,357422	0,357422	0,246655	0,200162	0,173012	0,153868	0,140643	0,130208	0,121862	0,114635	0,108341
10	0,143342	0,143342	0,137139	0,13182	0,127079	0,12249	0,11855	0,114813	0,111265	0,107764	0,104245
20	0,081435	0,081435	0,079637	0,078075	0,076662	0,075307	0,074099	0,07296	0,07189	0,07082	0,069748
30	0,058554	0,058554	0,057641	0,056843	0,056111	0,055384	0,054749	0,054141	0,05357	0,052993	0,052414
40	0,046662	0,046662	0,046042	0,04551	0,04502	0,044562	0,044142	0,043741	0,043363	0,042979	0,042597
50	0,03937	0,03937	0,038939	0,038504	0,038153	0,037789	0,037498	0,037192	0,036911	0,036629	0,036347
60	0,034456	0,034456	0,034036	0,03374	0,033454	0,03318	0,03293	0,032698	0,032484	0,032254	0,032036
70	0,030898	0,030898	0,030545	0,030324	0,030018	0,029816	0,029595	0,029419	0,029272	0,029054	0,02887
80	0,028148	0,028148	0,027893	0,027628	0,027412	0,027253	0,027073	0,026909	0,026757	0,026603	0,026445
90	0,02602	0,02602	0,02577	0,025553	0,025373	0,02521	0,025073	0,024897	0,024765	0,024661	0,02453
100	0,024325	0,024325	0,024085	0,023878	0,023744	0,023561	0,023449	0,023297	0,023182	0,023062	0,022971

Табл.П.2.16 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,75$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,333594	0,106417	0,070885	0,051486	0,03797	0,02812	0,02099	0,016062	0,012955	0,011298	0,010656
10	0,124067	0,095332	0,072143	0,052734	0,038664	0,02847	0,021148	0,016124	0,012975	0,011304	0,010659
20	0,071027	0,061803	0,053962	0,045901	0,037241	0,028421	0,021175	0,016141	0,012983	0,011308	0,010662
30	0,05153	0,046472	0,041941	0,037204	0,032204	0,026796	0,02106	0,016147	0,012988	0,011311	0,010664
40	0,041404	0,037954	0,034797	0,031472	0,027947	0,024265	0,020283	0,016126	0,012991	0,011313	0,010665
50	0,035156	0,032566	0,030168	0,027591	0,024881	0,02208	0,019151	0,015936	0,012993	0,011314	0,010666
60	0,030968	0,028862	0,026943	0,024849	0,022653	0,020382	0,018057	0,015585	0,012986	0,011315	0,010667
70	0,027932	0,026153	0,024572	0,022821	0,020969	0,019058	0,017142	0,015148	0,012954	0,011316	0,010667
80	0,025652	0,024084	0,022727	0,021248	0,019657	0,018024	0,01638	0,014717	0,01289	0,011317	0,010668
90	0,023808	0,022447	0,021276	0,019986	0,018607	0,017189	0,015761	0,014309	0,012789	0,011317	0,010668
100	0,022341	0,021097	0,020096	0,01895	0,017745	0,016483	0,015237	0,013966	0,012667	0,011318	0,010669

Табл.П.2.17 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,8$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,305516	0,305516	0,220142	0,181822	0,159159	0,143674	0,132177	0,122748	0,115033	0,108544	0,102938
10	0,103388	0,103388	0,09989	0,096982	0,094516	0,092316	0,090361	0,088406	0,08658	0,084845	0,083142
20	0,059938	0,059938	0,058813	0,057777	0,056917	0,056146	0,05545	0,054756	0,054099	0,053467	0,052843
30	0,044059	0,044059	0,043359	0,042794	0,042304	0,041863	0,041463	0,041063	0,040687	0,040319	0,039953
40	0,035791	0,035791	0,035525	0,034936	0,034539	0,034231	0,033954	0,033638	0,033449	0,033155	0,032902
50	0,030714	0,030714	0,030325	0,030009	0,029737	0,029532	0,029281	0,029066	0,028865	0,028669	0,028472
60	0,027288	0,027288	0,026978	0,026707	0,026478	0,026285	0,026103	0,025895	0,025769	0,025604	0,025441
70	0,024795	0,024795	0,024546	0,024281	0,024101	0,023912	0,02382	0,023622	0,02353	0,023336	0,023211
80	0,022921	0,022921	0,022731	0,02249	0,022282	0,022129	0,022	0,021895	0,021748	0,021667	0,021537
90	0,02147	0,02147	0,021273	0,021042	0,020869	0,02074	0,020609	0,020492	0,020411	0,020305	0,020227
100	0,020255	0,020255	0,020059	0,019881	0,019739	0,019597	0,019485	0,01938	0,019279	0,019185	0,019099

Табл.П.2.18 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,85$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,289155	0,104915	0,070827	0,051632	0,038168	0,028246	0,021039	0,016044	0,012893	0,011221	0,0106
10	0,085885	0,072236	0,061334	0,050417	0,038984	0,028781	0,021302	0,016149	0,012928	0,011231	0,010604
20	0,050556	0,045374	0,040913	0,0363	0,031458	0,02643	0,021085	0,016161	0,012938	0,011235	0,010607
30	0,037682	0,034567	0,031816	0,028889	0,025854	0,022719	0,019442	0,016007	0,012946	0,011238	0,010609
40	0,031001	0,028741	0,02677	0,024648	0,022428	0,020152	0,017835	0,015413	0,012935	0,01124	0,01061
50	0,026937	0,025105	0,023583	0,021923	0,020143	0,018382	0,016597	0,014759	0,012835	0,011241	0,010611
60	0,024154	0,022647	0,021381	0,020031	0,018605	0,017115	0,015672	0,014199	0,012682	0,011241	0,010612
70	0,022136	0,020828	0,019757	0,018636	0,017432	0,01618	0,014942	0,013733	0,012494	0,011239	0,010612
80	0,020673	0,019435	0,018514	0,017565	0,016535	0,015479	0,014394	0,013356	0,012306	0,011232	0,010613
90	0,01945	0,018388	0,017561	0,016718	0,015822	0,014899	0,013969	0,013049	0,012143	0,011217	0,010613
100	0,01849	0,017507	0,016761	0,016006	0,015215	0,014427	0,013596	0,012776	0,011994	0,011197	0,010613

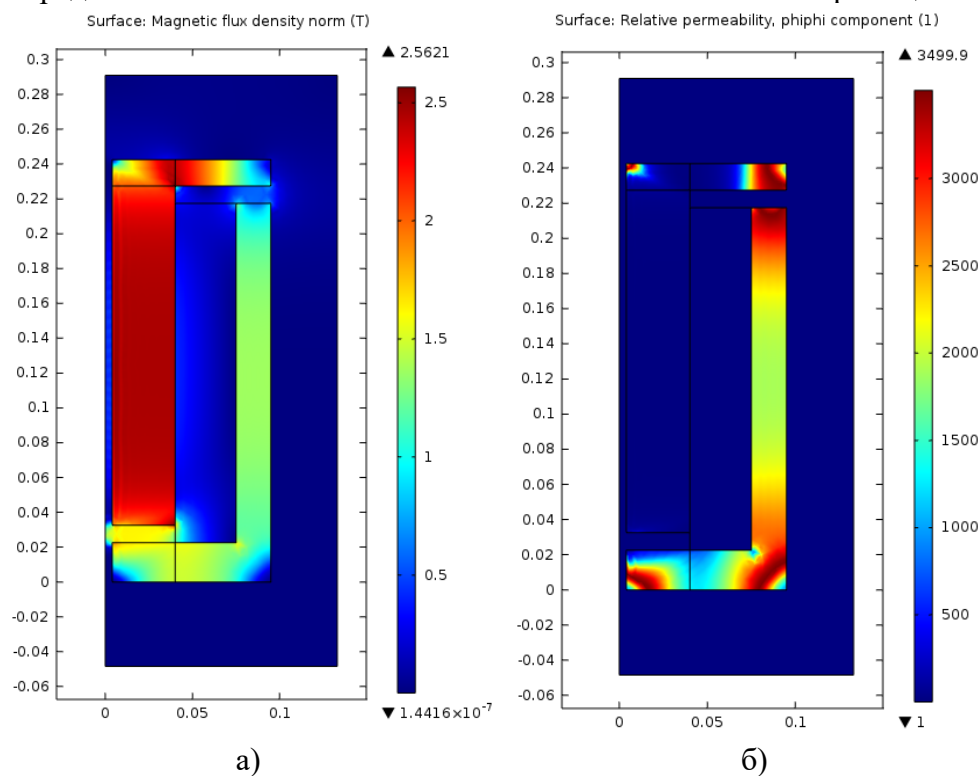
Табл.П.2.19 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,9$

L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,250547	0,250547	0,193392	0,166133	0,148194	0,135587	0,125764	0,117717	0,110958	0,105155	0,100153
10	0,06255	0,06255	0,061102	0,06004	0,059094	0,058246	0,05744	0,056749	0,056028	0,055285	0,054652
20	0,03814	0,03814	0,037509	0,037023	0,036682	0,036269	0,035993	0,035666	0,035364	0,035067	0,034782
30	0,029308	0,029308	0,028891	0,028621	0,028316	0,028091	0,027833	0,027686	0,027465	0,027302	0,027126
40	0,024684	0,024684	0,024367	0,02413	0,023961	0,023785	0,02362	0,023485	0,023324	0,023145	0,023063
50	0,021915	0,021915	0,02164	0,021472	0,021254	0,021142	0,020965	0,020831	0,020752	0,020601	0,02053
60	0,020033	0,020033	0,01979	0,019609	0,019455	0,019328	0,019207	0,019082	0,018986	0,018879	0,018833
70	0,018643	0,018643	0,018428	0,018286	0,018153	0,018045	0,017933	0,017833	0,01774	0,017639	0,017552
80	0,01763	0,01763	0,017405	0,017249	0,017122	0,017052	0,016913	0,016873	0,016785	0,016692	0,016635
90	0,016794	0,016794	0,016645	0,01646	0,016337	0,016277	0,016164	0,016064	0,016034	0,015917	0,015855
100	0,016137	0,016137	0,015967	0,015818	0,015731	0,015611	0,01552	0,015452	0,015419	0,015333	0,015293

Табл.П.2.20 – Значение $L = f(\delta, i)$ при $r' = 0,95$

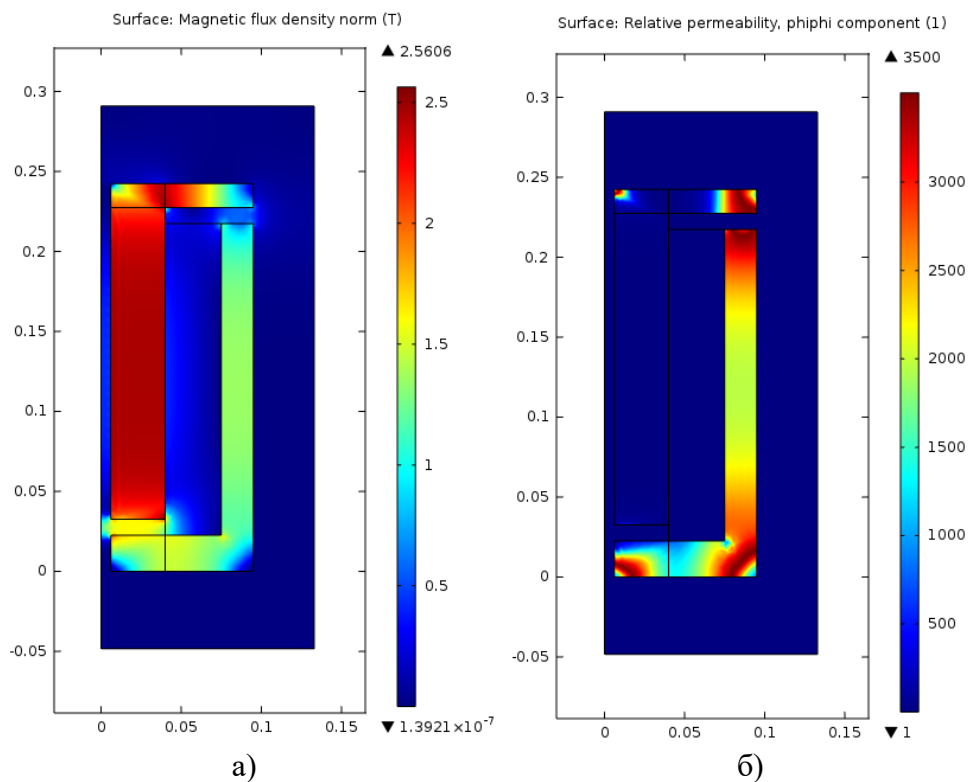
L, Гн	$\delta, \text{ мм}$										
i, А	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0	0,192127	0,090277	0,06347	0,047289	0,035541	0,026678	0,020128	0,015533	0,012618	0,01108	0,010528
10	0,037617	0,034171	0,031306	0,028287	0,025212	0,022076	0,018881	0,015648	0,012719	0,011107	0,010535
20	0,02499	0,02318	0,021761	0,020263	0,018705	0,017139	0,015573	0,014006	0,012474	0,011112	0,010538
30	0,020396	0,019058	0,018163	0,017175	0,016162	0,015119	0,01407	0,013036	0,01203	0,011099	0,01054
40	0,018084	0,016991	0,016266	0,01553	0,014746	0,013997	0,013215	0,012452	0,011716	0,011028	0,010542
50	0,016639	0,015677	0,015089	0,014506	0,013906	0,013266	0,01268	0,012073	0,011491	0,010951	0,010542
60	0,015668	0,014782	0,014281	0,013805	0,01331	0,012807	0,012294	0,011807	0,011325	0,010879	0,010542
70	0,014967	0,014146	0,013711	0,0133	0,012876	0,012445	0,012025	0,011592	0,011204	0,010829	0,010538
80	0,014454	0,013666	0,013241	0,012884	0,012533	0,012157	0,011817	0,011455	0,011107	0,010787	0,010532
90	0,014019	0,01325	0,012928	0,012611	0,012298	0,011947	0,01165	0,011332	0,011026	0,010748	0,010524
100	0,013696	0,012938	0,012614	0,012362	0,012084	0,011798	0,011514	0,011225	0,010964	0,010716	0,010517

Распределение магнитного поля и относительной магнитной проницаемости



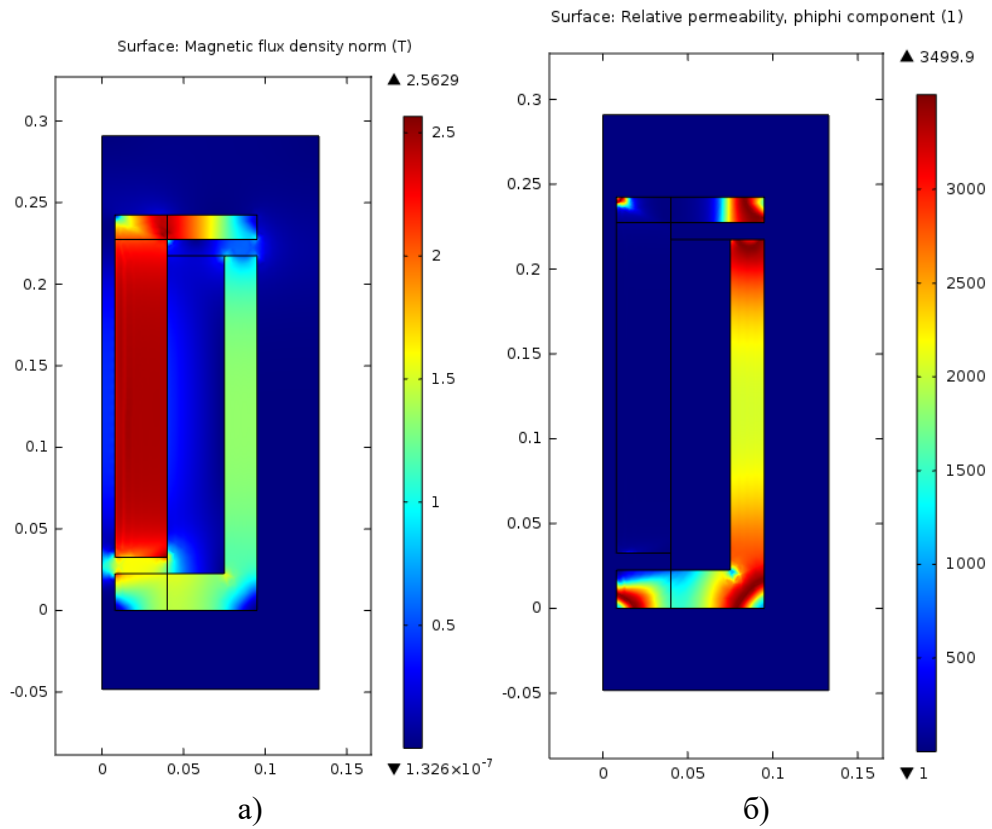
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,1, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/м}^2\text{]}$$



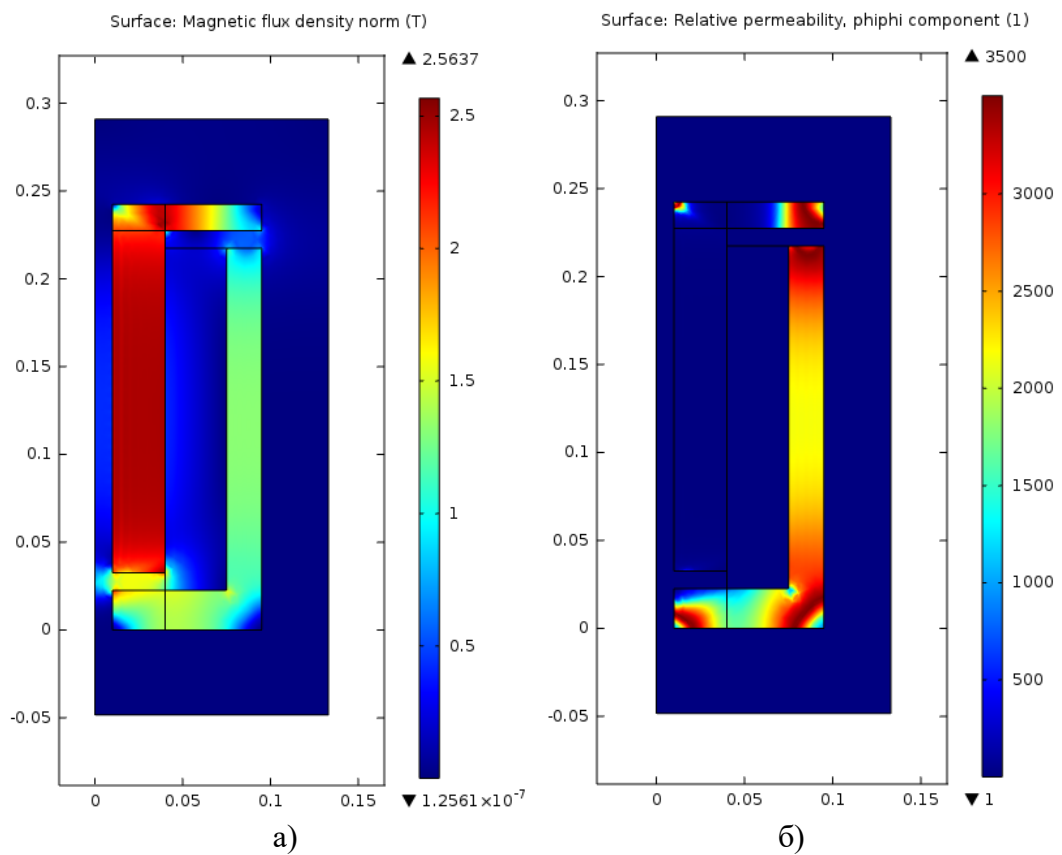
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,15, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/м}^2\text{]}$$



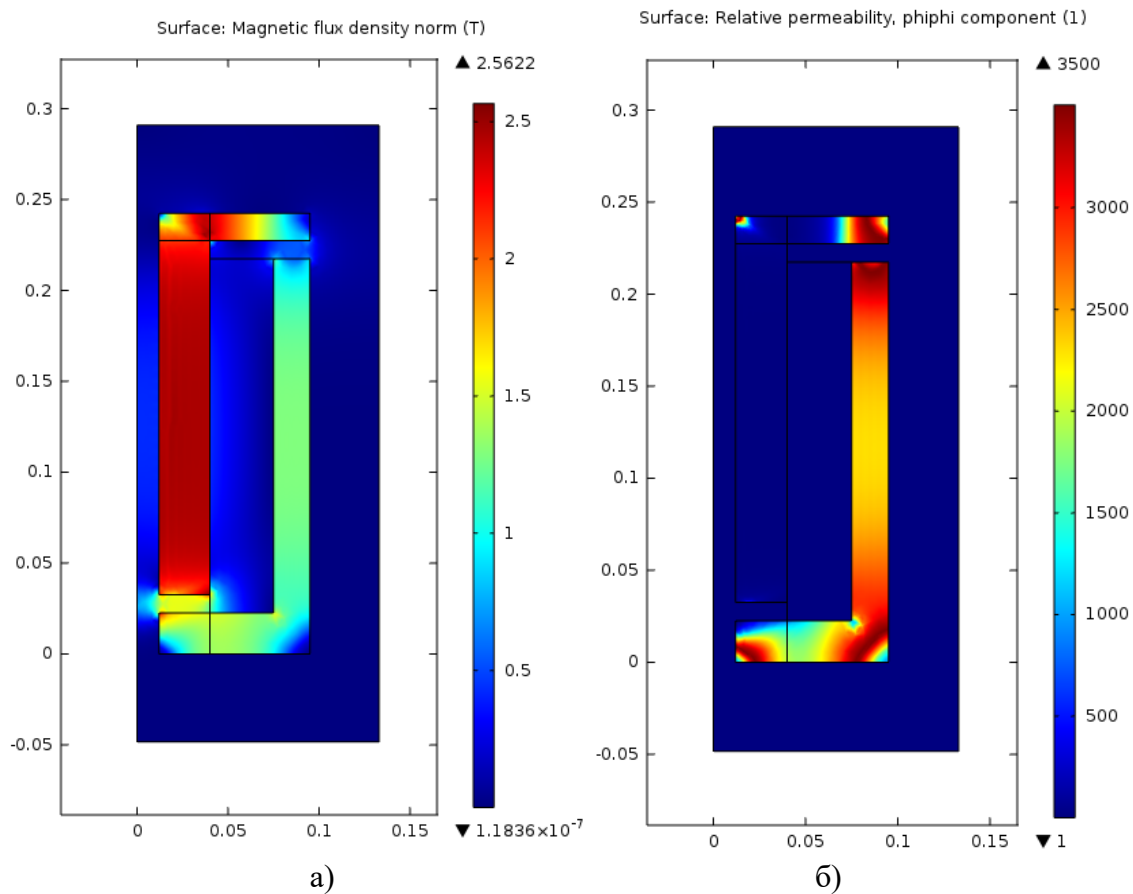
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,2, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



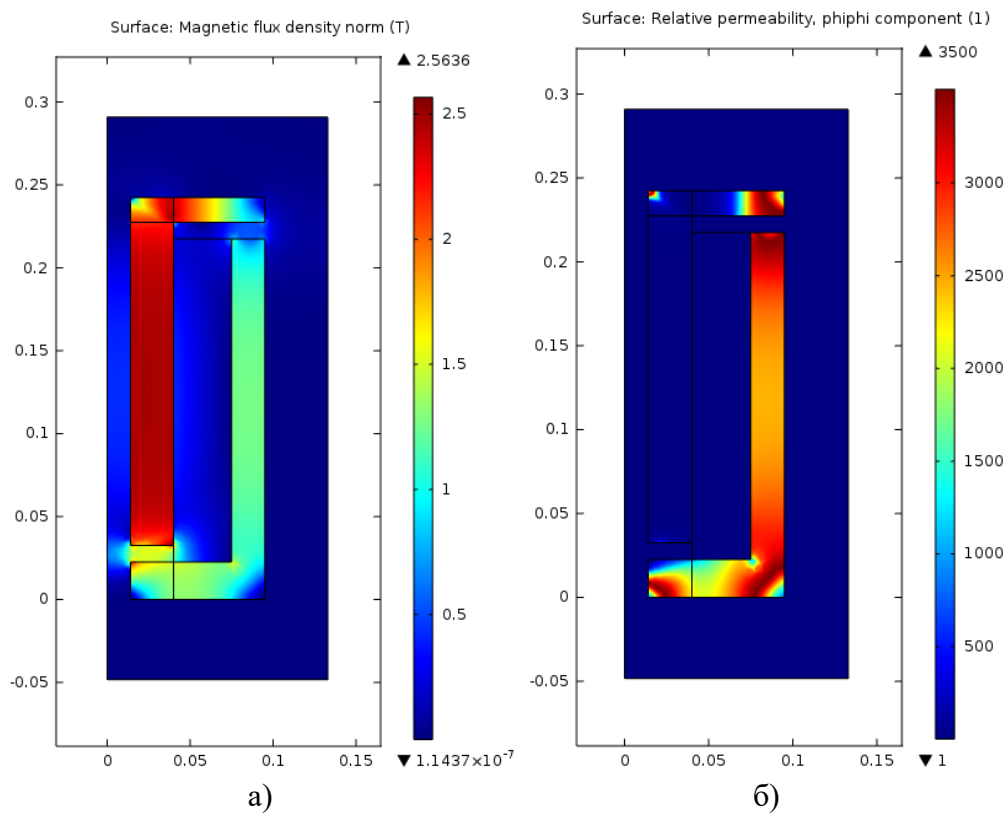
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,25, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



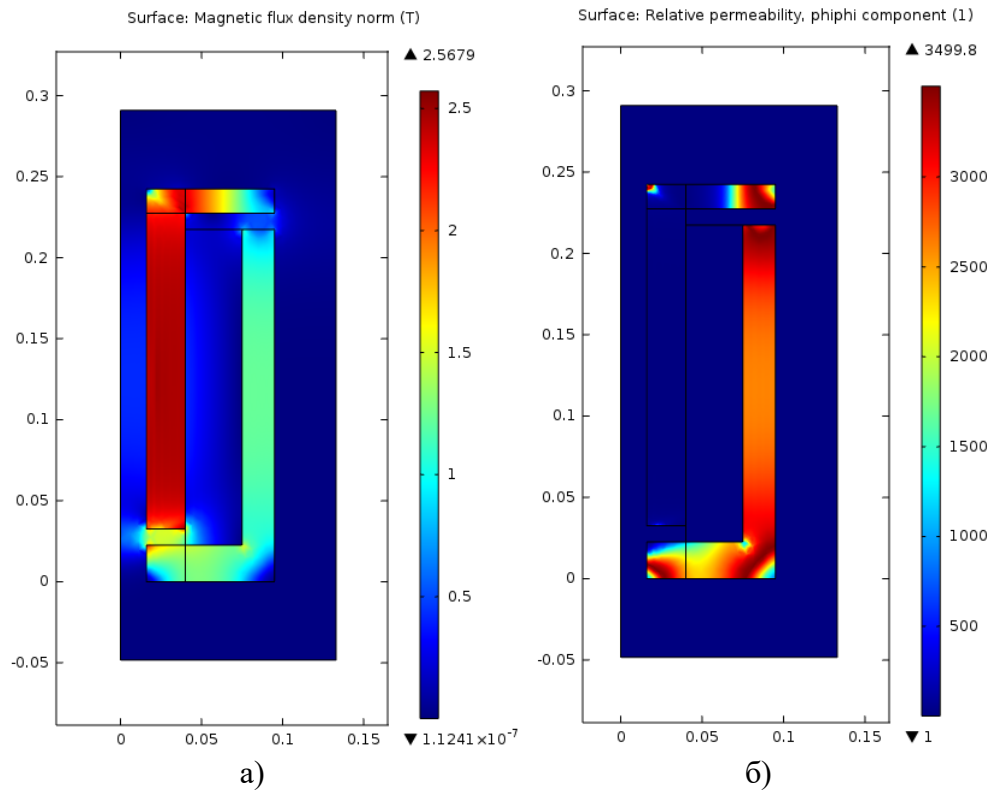
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,3, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



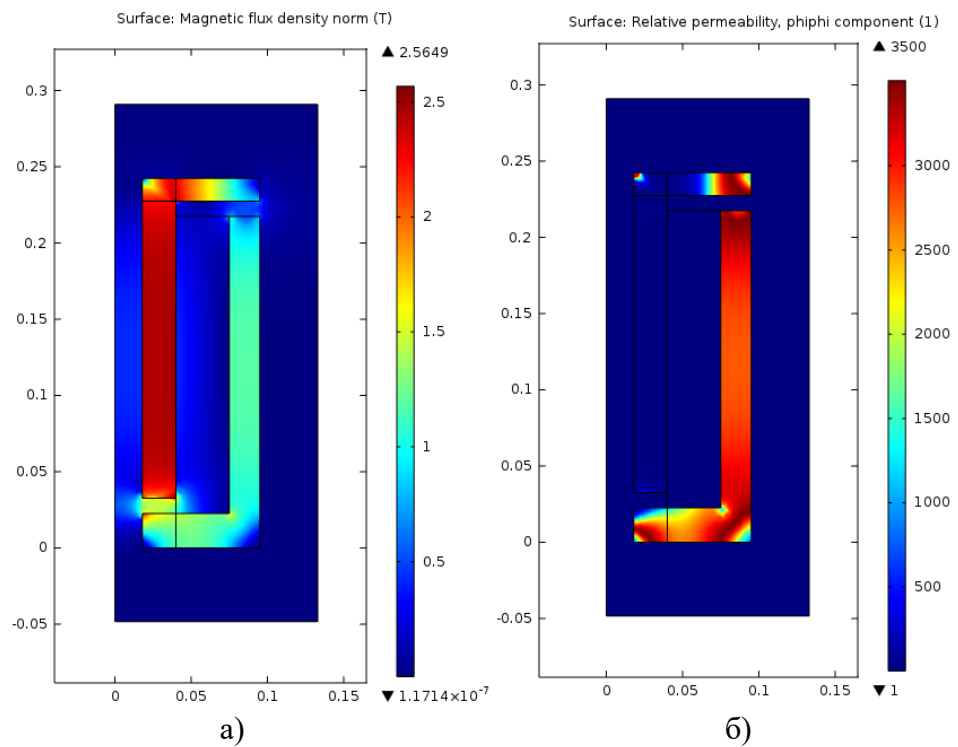
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,35, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



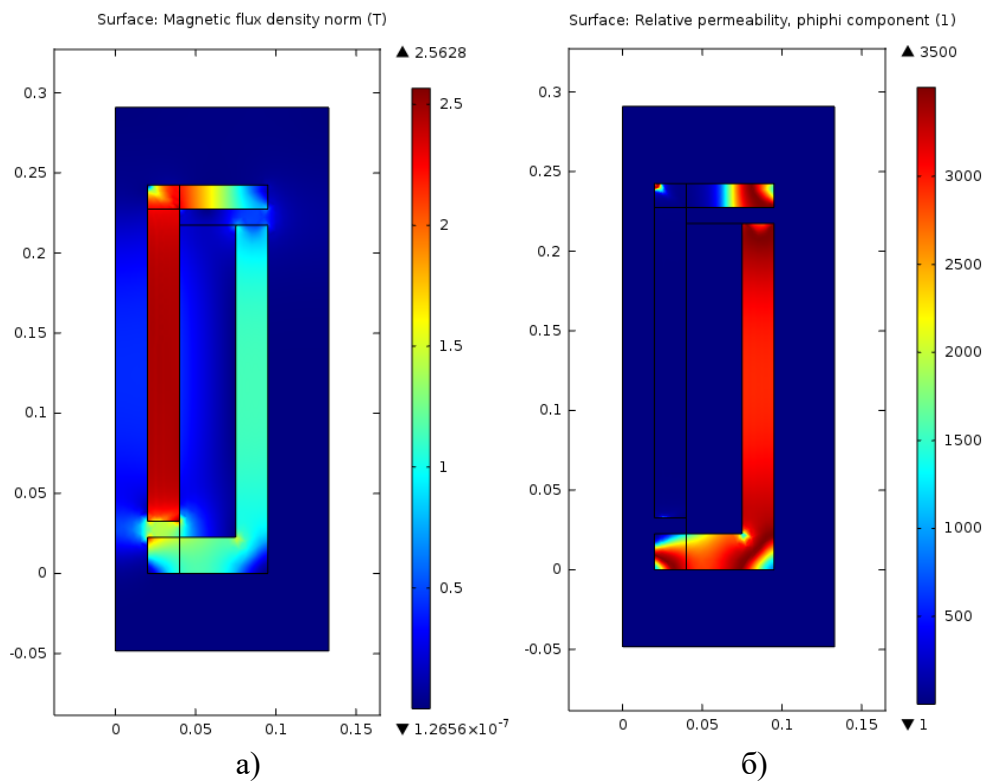
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,4, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

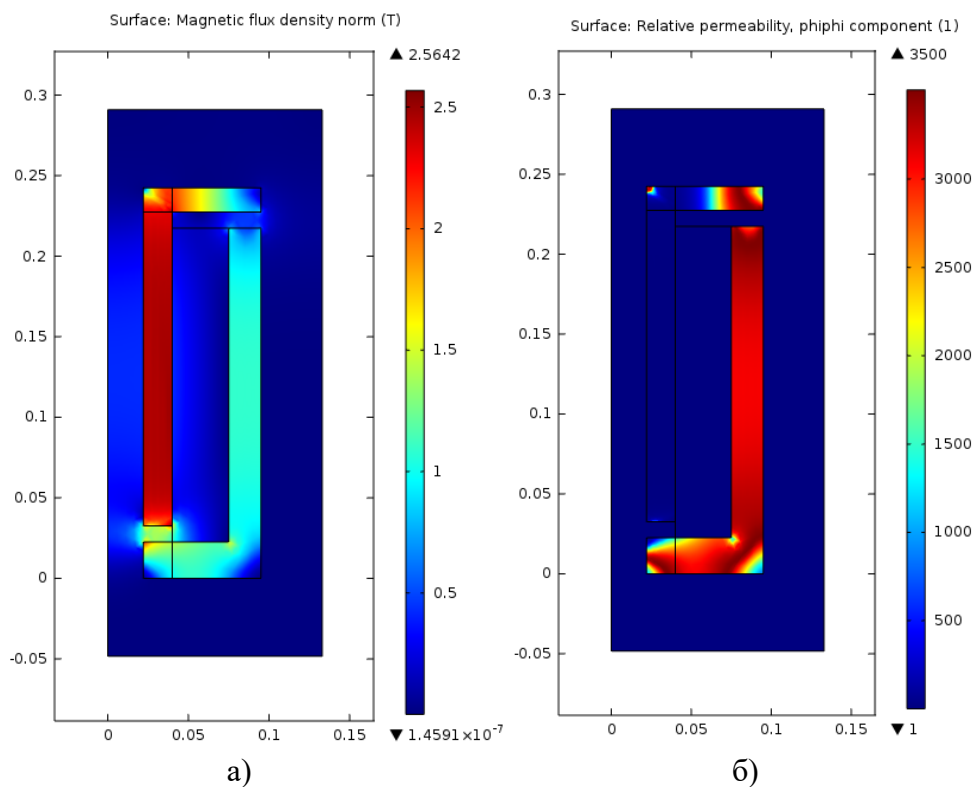


а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

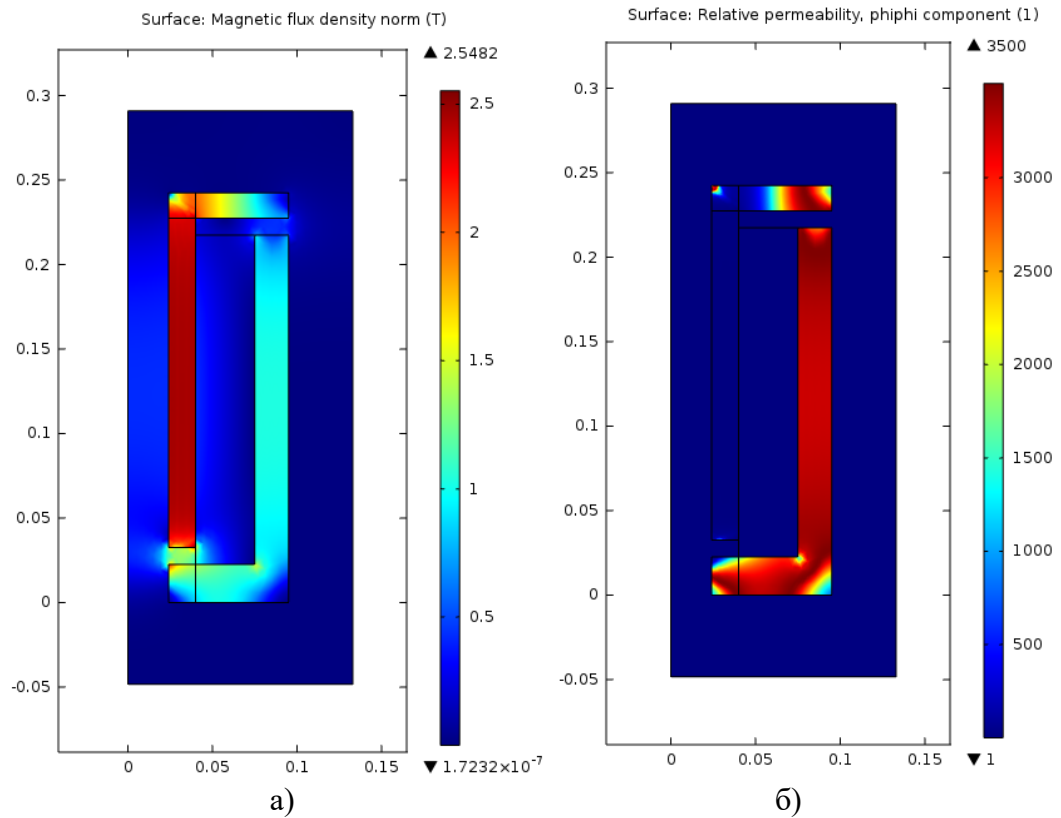
$$r'^* = 0,45, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



$$r'^* = 0,5, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

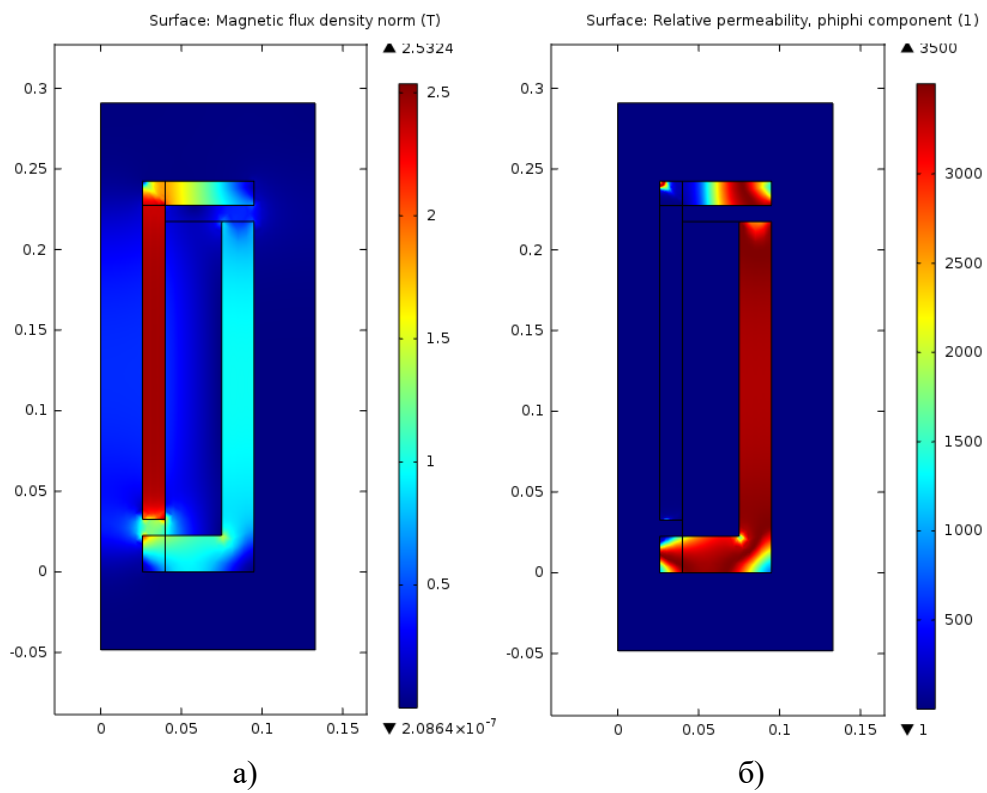


$$r'^* = 0,55, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



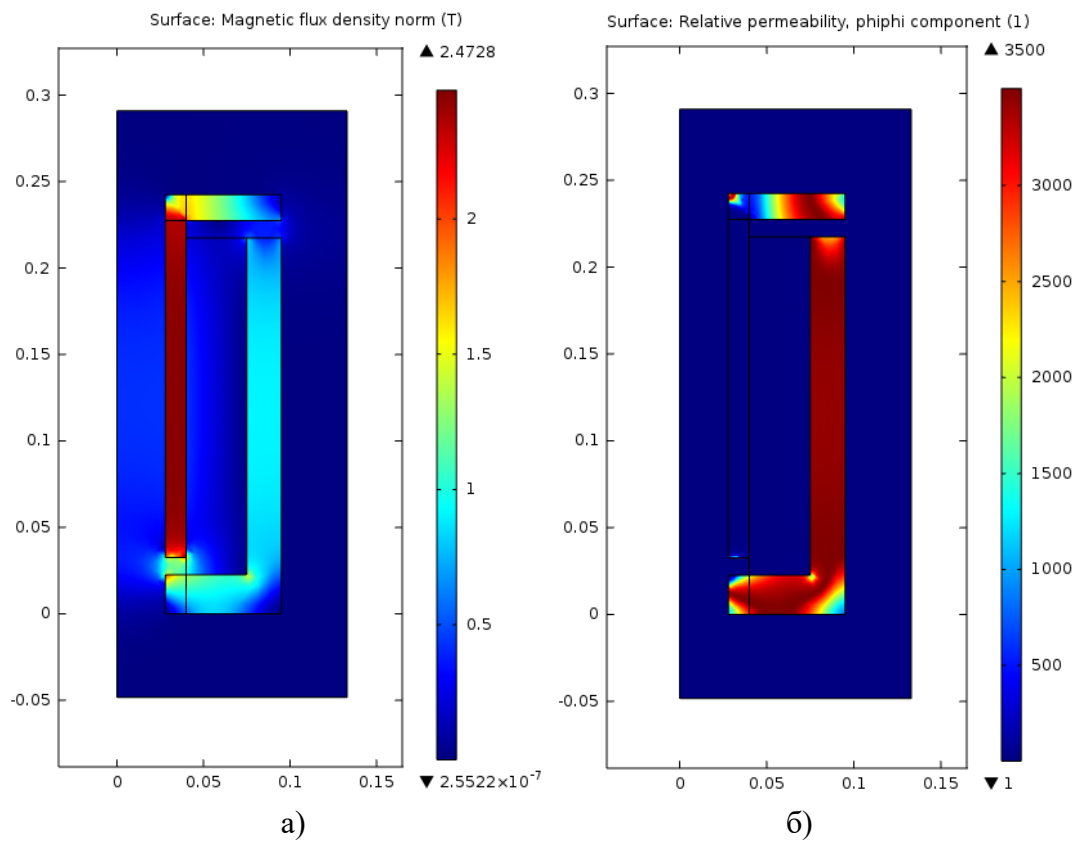
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,6, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



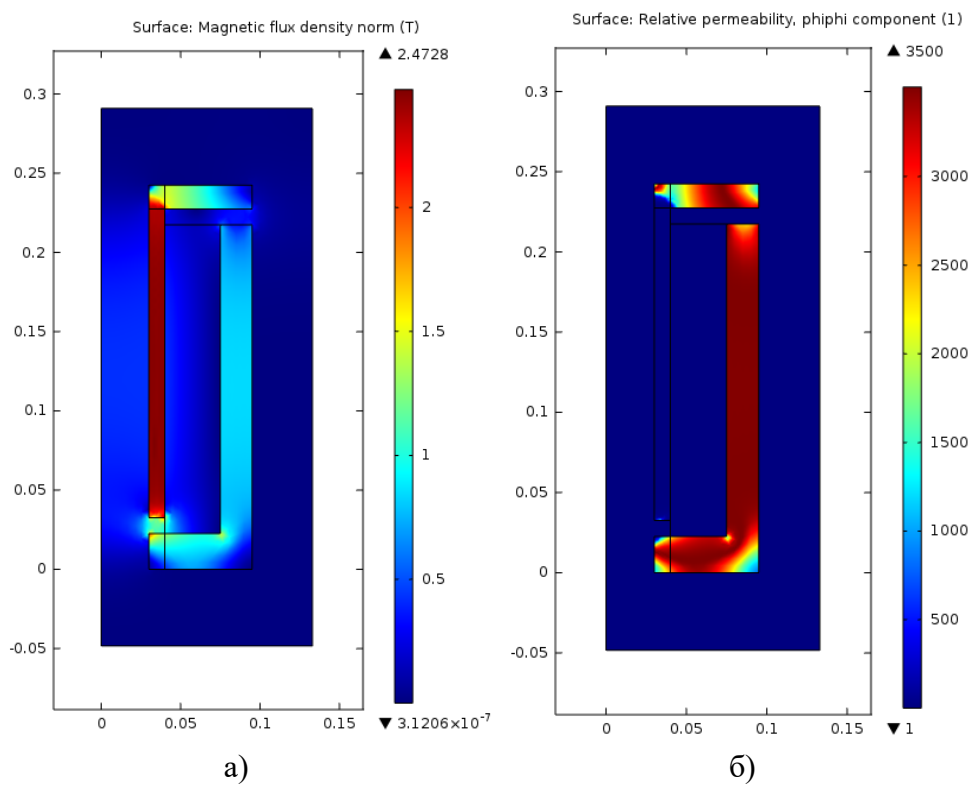
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,65, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



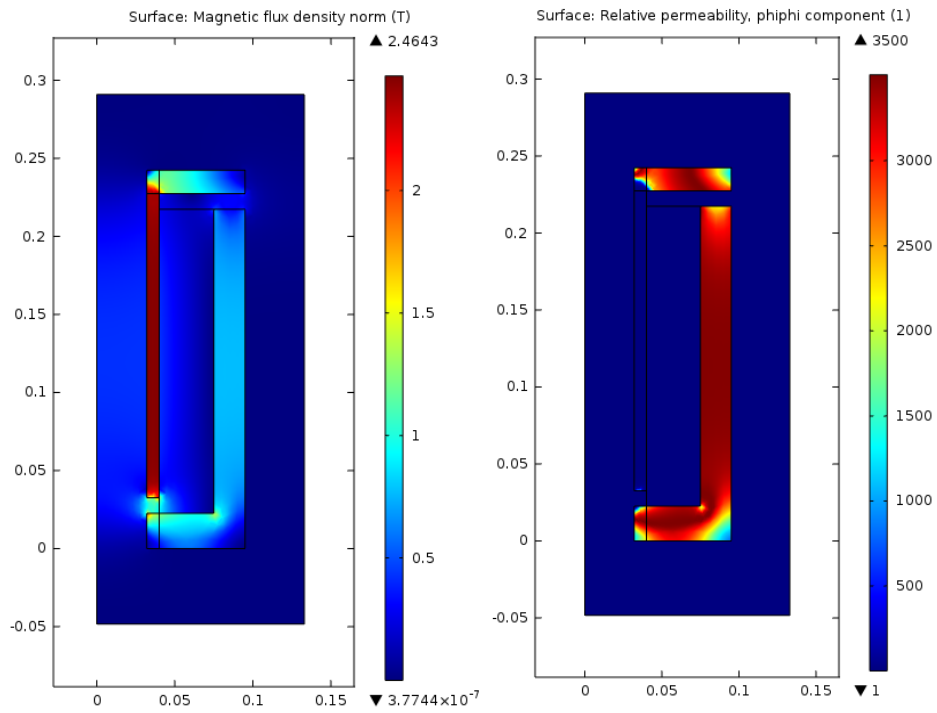
а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,7, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,75, j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

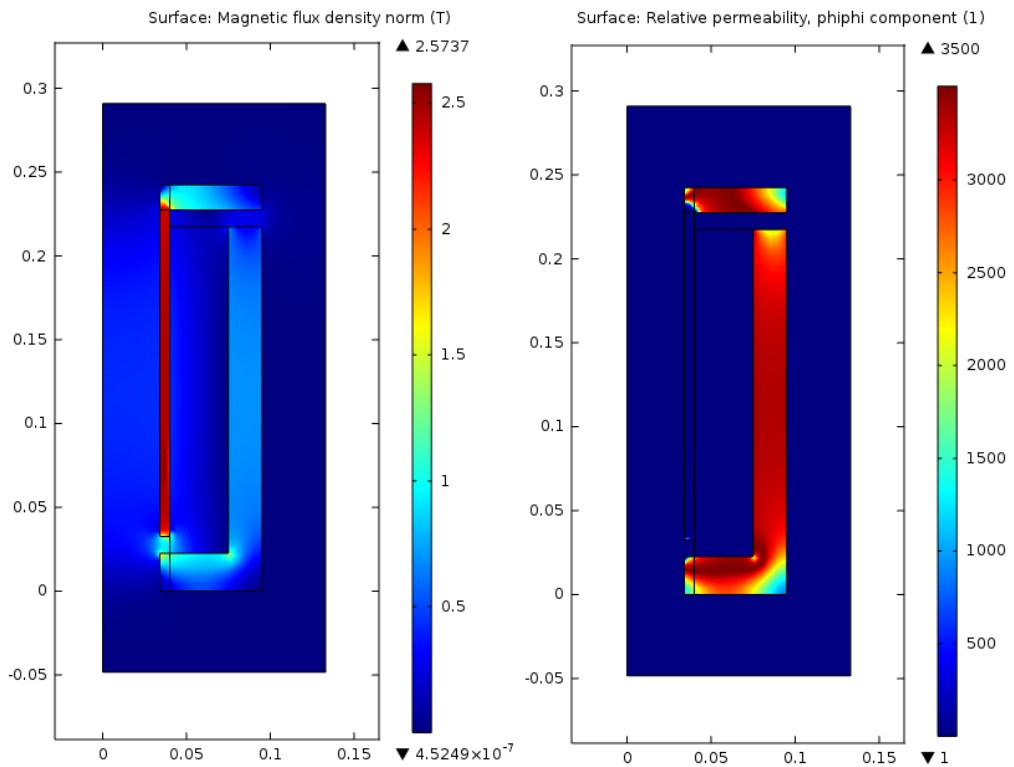


а)

б)

а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,8, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

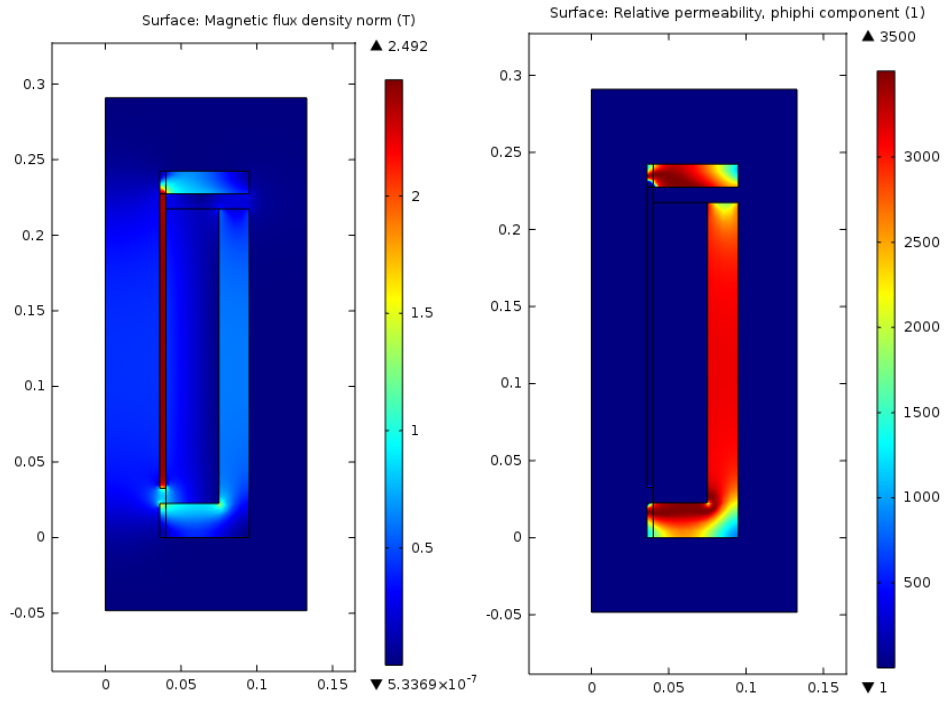


а)

б)

а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,85, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

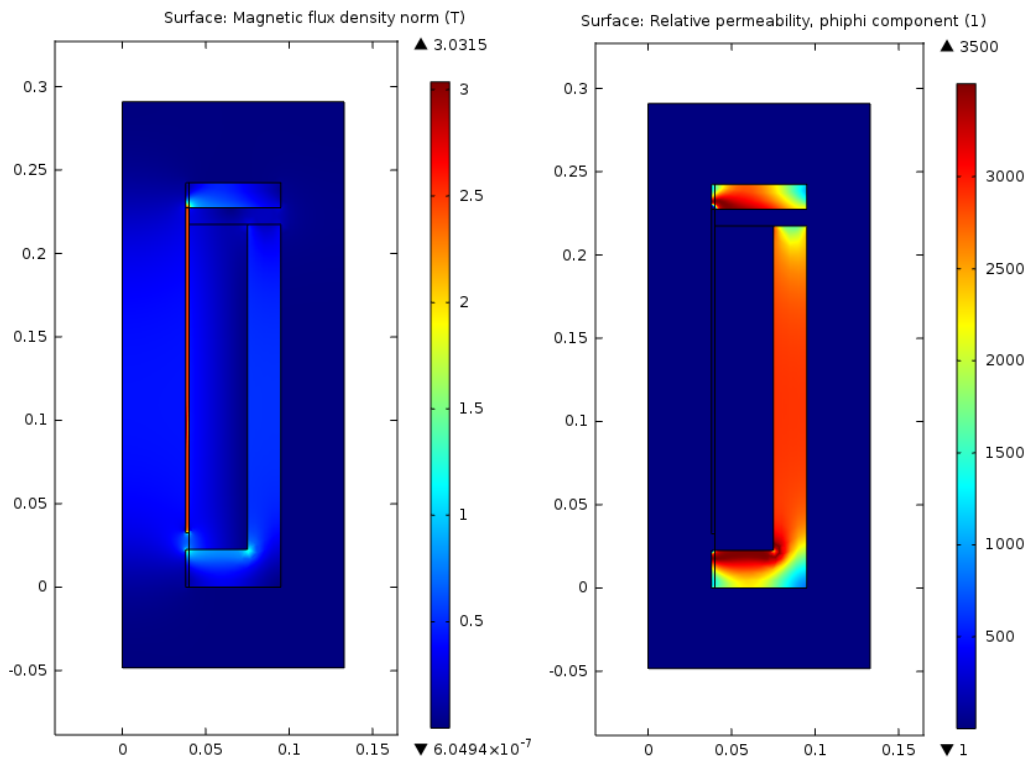


а)

б)

а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,9, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$



а)

б)

а) – магнитная индукция; б) относительная магнитная проницаемость

$$r'^* = 0,95, \quad j = 1 \cdot 10^7 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

П.4 Преобразователи, подключаемые к сети переменного тока

Схемы электрических преобразователей, предназначенных для подключения к сети переменного тока, рассмотрены в [195,169]. Наибольший интерес к использованию для управления электромагнитными машинами представляет ЭП, содержащий в основе трехфазный однополупериодный выпрямитель с анодной группой силовых тиристоров и оптронной развязкой формирователя управляющих сигналов (рис.П4.1). Управляемый выпрямитель на тиристорах $VS1 - VS3$ нагружен обмоткой LM ЛЭМД. Для гашения остаточной энергии магнитного поля обмотка шунтирована цепочкой из последовательно включенных диода $VD6$ и резистора $R9$. Управление работой преобразователя осуществляется кнопкой SB .

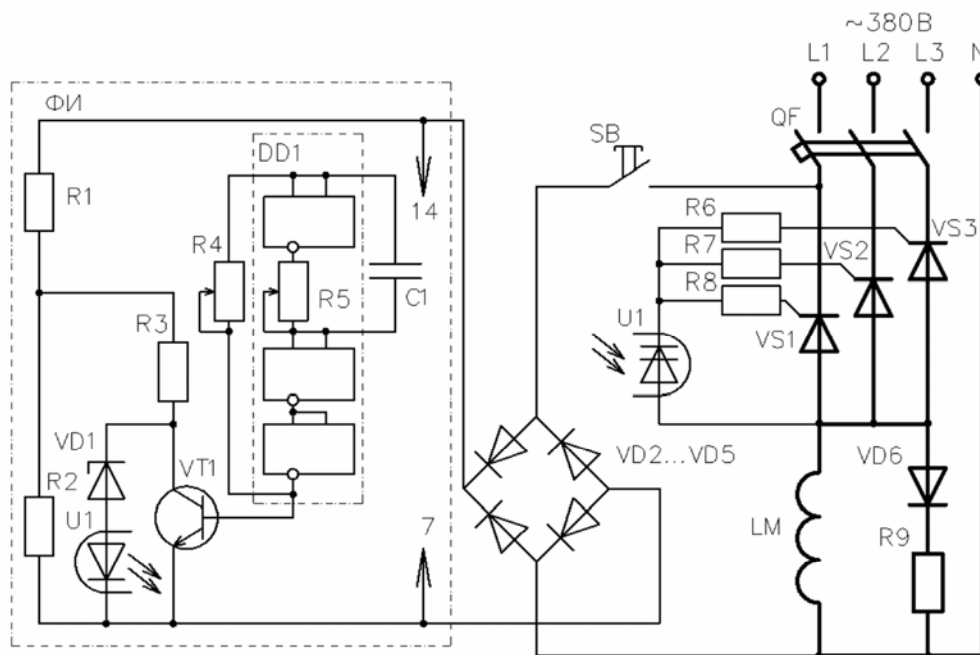


Рис.П4.1 – Схема импульсного электрического преобразователя для питания ЛЭМД от трехфазной сети

Для совершения ходов якоря с заданной частотой, схема содержит формирователь импульсов ФИ, состоящий из микросхемы $DD1$, светодиода тиристорного оптрона $U1$, транзистора $VT1$ и стабилитрона $VD1$. Питание ФИ осуществляется выпрямленным напряжением через делитель, составленный из резисторов $R1$ и $R2$.

Работа электрического преобразователя осуществляется следующим образом. При нажатии кнопки SB получает питание формирователь импульсов ФИ. На выходе микросхемы $DD1$, будет логический 0, транзистор $VT1$ останется закрытым и, следовательно, светодиод тиристорного оптрона $U1$, через стабилитрон $VD1$, окажется под напряжением. Излучение светодиода оптрона $U1$ приводит к засвечиванию и отпираанию фототиристора оптрона $U1$, протеканию тока через управляющие электроды тиристоры $VS1 - VS3$, по обмотке LM протекает ток, вызывая срабатывание ЛЭМД.

После совершения рабочего хода ЛЭМД на выходе микросхемы $DD1$ появляется логическая единица, что приводит к отпираанию транзистора $VT1$. Напряжение на переходе коллектор – эмиттер резко падает, стабилитрон $VD1$ запирается и светодиод оптрона $U1$ обесточивается. В результате, силовые тиристоры $VS1 - VS3$ закрываются, а остаточная энергия магнитного поля, запасенная обмоткой LM ЛЭМД, рассеивается в контуре $LM - VD6 - R9$. Якорь под действием упругого элемента возвращается в исходное положение. Далее описанный цикл работы повторяется.

Изменяя величину сопротивления резистора $R4$ можно регулировать скважность управляющих импульсов, и, как следствие, время протекания тока через обмотку LM ЛЭМД, тем самым управлять энергией удара электромагнитной машины. Подстроечным резистором $R5$ задают требуемую частоту управляющих импульсов и, следовательно, частоту ходов якоря ЛЭМД.

Достоинством данного электрического преобразователя является стабильность выходных параметров.

Схема, представленная на рис.П4.2, позволяет управлять электромагнитной машиной от однофазной сети переменного тока. Электрический преобразователь состоит из релаксационного генератора на однопереходном транзисторе $VT1$ и формирователя импульсов на тиристоре $VS1$. Управление ИЭП осуществляется кнопками SA – для работы в автоматическом режиме и SB – для проверки работоспособности ударной машины.

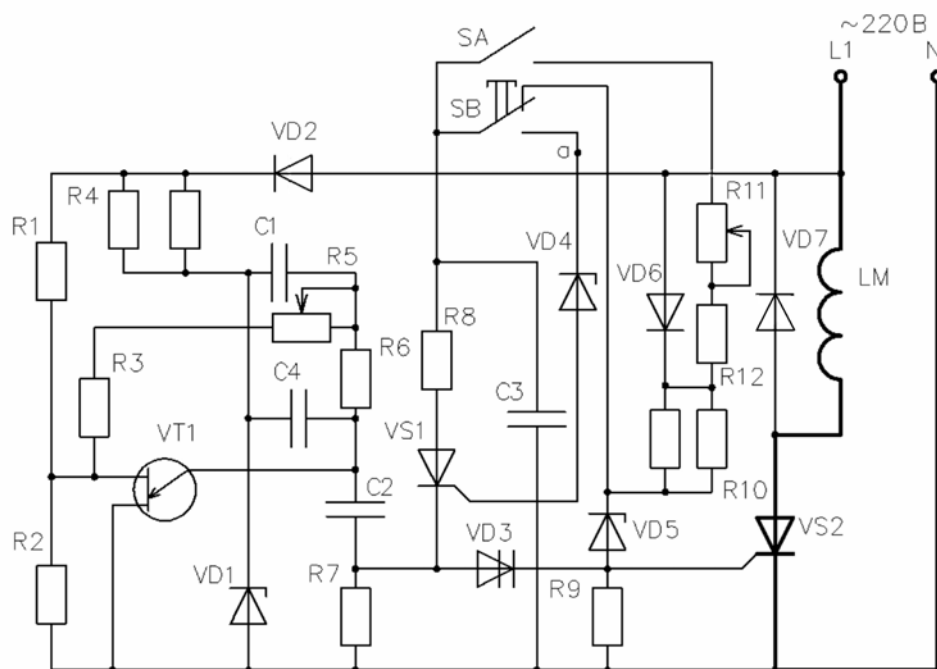


Рис.П4.2 – Схема импульсного электрического преобразователя для питания ЛЭМД от однофазной сети

Генератор включает в себя однопереходный транзистор $VT1$, времязадающий конденсатор $C2$, заряжающийся через резисторы $R5$ и $R6$ от стабилизатора напряжения на стабилитроне $VD1$ и резисторе $R4$. Резисторы $R1$ и $R2$ образуют делитель напряжения, определяющий межбазовое напряжение транзистора $VT1$. Формирователь импульсов содержит тиристор $VS1$, пороговый элемент, выполненный на стабилитроне $VD4$, накопительный конденсатор $C3$, напряжение на котором при работе УМ в режиме проверки работоспособности задается стабилизатором на стабилитроне $VD5$ и резисторе $R10$.

Работа ЭП в режиме проверки работоспособности осуществляется следующим образом. При подаче питания и не нажатой кнопке SB конденсатор $C2$ заряжается до уровня, определяемого величиной напряжения включения транзистора $VT1$, а затем через транзистор разряжается на резистор $R7$, формируя на нем отрицательный синхронизирующий импульс.

Параметры элементов генератора выбраны таким образом, что включение транзистора происходит один раз в течение положительного полупериода сети. Одновременно конденсатор $C3$ через размыкающий контакт кнопки SB заряжается до напряжения, определяемого стабилитроном $VD5$.

При нажатии на кнопку SB управляющий электрод тиристора $VS1$ через стабилитрон $VD4$ соединяется с его анодом, но включение тиристора $VS1$ не произойдет, так как напряжение стабилизации стабилитрона $VD5$ выбрано меньше чем напряжение стабилитрона $VD4$. Ти-

ристор $VS1$ включается, когда потенциал его катода снизится за счет напряжения синхронизирующего импульса, снимаемого с резистора $R7$. При этом конденсатор $C3$ разряжается через управляющий переход, формируя ток управления тиристора $VS2$, который подключит обмотку LM ЛЭМД к сети, якорь, под действием магнитного поля, совершит рабочий ход.

Повторного срабатывания ЛЭМД при последующем положительном полупериоде напряжения не происходит, поскольку конденсатор $C3$ разряжен.

Для обеспечения непрерывных ходов бойка ударной машины при нажатой кнопке SB дополнительно замыкается переключатель SA . Конденсатор $C3$ заряжается от сети через резисторы $R11$ и $R12$ с постоянной времени, превышающей период сети. Подключение обмотки LM ЛЭМД к сети произойдет тогда, когда напряжение, приложенное к тиристорам $VS1$, превысит пороговое напряжение. После разряда конденсатора $C3$ тиристор $VS1$ запирается, конденсатор вновь начинает заряжаться, и процессы повторяются.

Основными достоинствами данного электрического преобразователя являются: регулировка усилия и частоты ходов ЛЭМД; стабилизация выходных параметров при отклонении питающего напряжения.

Эффективным способом повышения выходных показателей редкоударных машин с ЛЭМД, например, сводообрушителей, служит форсировка процесса аккумуляирования магнитной энергии в индуктивностях машины на этапе трогания при неподвижном якоре. Практическая реализация такого способа обеспечивается с помощью вспомогательных удерживающих устройств, в частности, электромагнита (ЭМУ). Однако преимущества электромагнитного удержания реализуются в полной мере, если для питания обеих обмоток применен один источник и обеспечены необходимая последовательность включения и фазовый сдвиг между питающими обмотки ЭМУ и ЛЭМД импульсами напряжения и тока в каждом цикле энергопреобразования. Для обеспечения требуемого алгоритма разработан тиристорный преобразователь для питаемых одной полувольтной выпрямленного напряжения сети линейных двигателей небольшой мощности ($A_y < 35$ Дж) с ЭМУ [195].

Известные устройства для управления однообмоточными электромагнитными двигателями, включающие формирователь импульсов на однопереходном транзисторе, не позволяют совмещать одновременное управление работой двигателя и работой удерживающего электромагнита. В разработанном преобразователе питание обмоток двигателя и удерживающего электромагнита осуществляется смежными выпрямленными полуволнами напряжения одного источника (сети), а формирование, регулирование и автоматическая коррекция фазы управляющих импульсов при колебаниях питающего напряжения производится общим формирователем импульсов. Это обеспечивает и регулировку выходных параметров (энергии A_y , частоты ходов n) ЛЭМД по условиям технологического процесса, и их стабилизацию при колебаниях напряжения сети.

Принципиальная электрическая схема и временные диаграммы, поясняющие ее работу, показаны, соответственно, на рис.П4.3 и рис.П4.4 [195]. Устройство содержит регулируемый и синхронизированный с частотой питающей сети формирователь управляющих импульсов (ФИ); накопительные, с цепями заряда, конденсаторы $C2$, $C3$ для формирования тока управления тиристоров $VS1$, $VS2$, нагруженных обмотками ЭМУ ($YA1$) и ЛЭМД ($YA2$); селектор-коммутатор отпирающих импульсов для $VS1$, $VS2$ (СКИ); элементы управления режимами работы ЛЭМД (одиночные – непрерывные срабатывания с заданной частотой) SA , SB . Применение тиристорных оптронов в схеме устройства обеспечивает гальваническую развязку между цепями и улучшает его показатели.

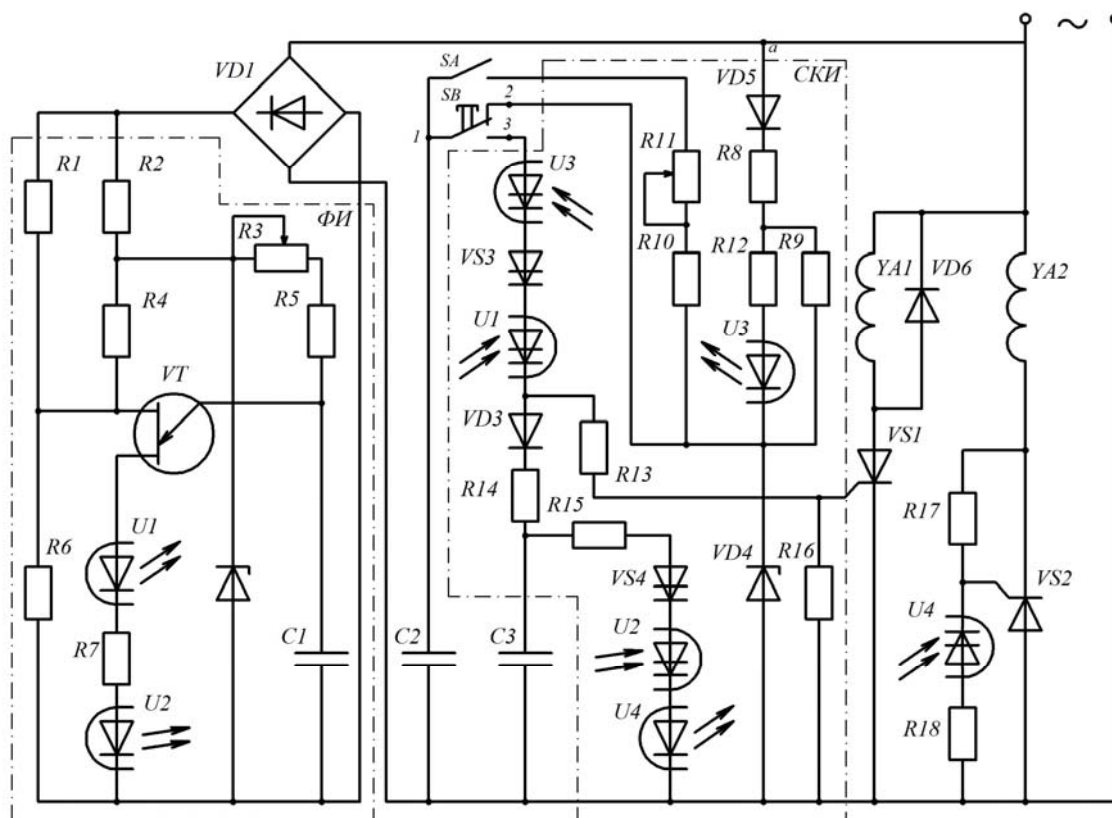


Рис.П4.3 – Принципиальная электрическая схема управления ЛЭМД с узлом статического нагружения якоря с $A_y=25...35$ Дж

При подаче напряжения на входные зажимы преобразователя и исходном положении органов управления (SA , SB) его работу определяют два самостоятельных процесса в блоках ФИ и СКН. Через контакты 1-2 элемента SB происходит заряд конденсатора $C2$ однополупериодным пульсирующим напряжением выпрямителя $VD5$ с постоянной времени $\tau_2=(R8+R9)C2$ и до значения, определяемого стабилитроном $VD4$ (рис.П4.4,г). При этом каждая положительная полуволна, отпирающая вентиль $VD5$ и заряжающая $C2$, обеспечивает протекание тока и через светодиод оптрона $U3$, его излучение и засвечивание фототиристора $U3$ в течение $t_u \approx T/2 = 1/2f$ каждого положительного полупериода напряжения сети (рис. П4.4,ж). Однако фототиристор $U3$ остается запертым из-за отсутствия положительного напряжения на его аноде.

Формирователь импульсов ФИ представляет собой релаксационный генератор на однопереходном транзисторе, питаемый выпрямленным несглаженным напряжением моста $VD1$, и, помимо транзистора VT , содержит времязадающий конденсатор $C1$, заряжающийся через резисторы $R3$, $R5$ от стабилизатора напряжения на стабилитроне $VD2$ и резисторе $R2$. Делитель напряжения $R4$, $R6$ определяет междубазовое напряжение $U_{бб}$ транзистора, а резистор $R1$ обеспечивает зависимость этого напряжения от питающего сети.

Параметры элементов генератора выбраны так, что при любом положении движка $R3$ заряд конденсатора $C1$ до напряжения включения транзистора VT и его последующий разряд через VT , резистор $R7$ и светодиоды оптронов $U1$, $U2$, обеспечивающий их кратковременное излучение, происходит один раз в каждом полупериоде напряжения сети (рис. П4.4,б). Эти процессы определяют состояние готовности преобразователя.

Режим одиночных ходов якоря ЛЭМД реализуется следующим образом. Замыкание контактов 1-3 SB в произвольный момент времени (например, t_1 , рис.П4.4,и) обеспечивает подачу положительного потенциала от заряженного теперь конденсатора $C2$ на цепочку, состоящую из последовательно включенных фототиристоров $U1$, $U3$ и $VS3$, которые при этом остаются запертыми. Момент их включения и начало разряда конденсатора $C2$ через резистор $R13$ в

управляющую цепь тиристора $VS1$ с его отпиранием, определяется совпадением двух состояний блоков СКИ и ФИ:

- положительной полярностью напряжения на аноде выпрямителя $VD5$;
- моментом переключения транзистора VT формирователя ФИ относительно начала полуволны напряжения, снимаемой с выходных зажимов моста $VD1$, питающего формирователь.

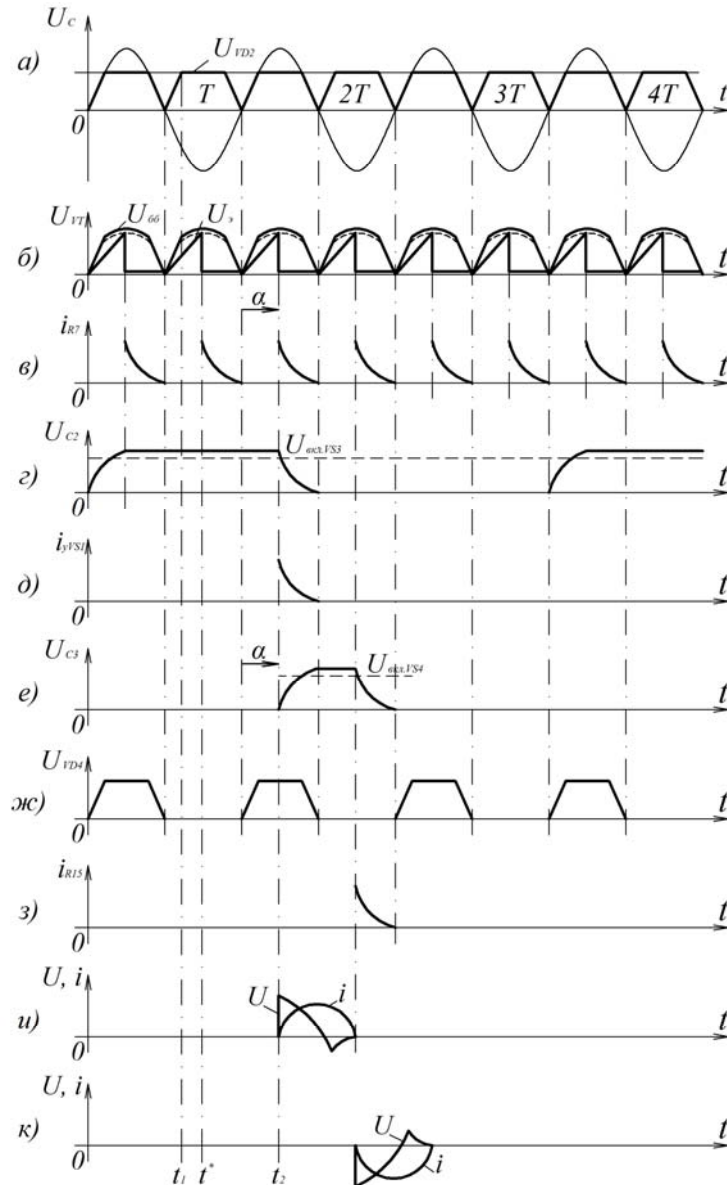


Рис.П4.4 – Временные диаграммы электрического преобразователя

Эти условия не выполняются в каждом отрицательном полупериоде питающего напряжения, когда вентиль $VD5$ заперт и светодиод $U3$ погашен (например, t^* , рис.П4.4,в,ж,и) и выполняются в каждом положительном полупериоде, когда $VD5$ проводит ток, а излучение светодиодов $U3$ и $U1$ включает фототиристоры $U1$, $U3$, и $VS3$ и формирует отпирающий импульс тока положительно смещенного тиристора $VS1$ (например, t_2 , рис.П4.4, в,д,ж,и). Поэтому цикл работы преобразователя всегда начинается в первую, после замыкания контактов 1-3 SB , положительную полуволну питающего напряжения, независимо от момента включения SB . Через обмотку удерживающего электромагнита $YA1$ начнет протекать ток, среднее значение которого зависит от угла управления $VS1$ и определяет усилие удержания ЭМУ. Одновременно через диод $VD3$ и резистор $R14$ током разряда $C2$ заряжается конденсатор $C3$. Постоянная времени цепи $R14C3=\tau_3$ выбирается так, чтобы $4\tau_3 < 0,5T$ и к моменту очередного изменения полярности на

аноде $VD5$ конденсатор успел зарядиться до напряжения U_{C3} , превышающего порог включения диода $VS4$, то есть $U_{C3} > U_{BKЛ\ VS4}$ (рис. П4.4,е).

Следующая за положительной отрицательная полуволна напряжения ("—" в точке «а») запирает тиристор $VS1$, а ток обмотки удерживающего электромагнита, протекавший по $VS1$, коммутируется в диод $VD6$. Поэтому удерживающее усилие ЭМУ продолжает действовать на якорь ЛЭМД еще некоторое время, определяемое запасом энергии в магнитной системе ЭМУ. Поскольку теперь полярность приложенного к тиристору $VS2$ и фототиристору оптрона $U4$ питающего напряжения оказывается прямой, то очередное переключение транзистора VT отпирает фототиристор оптрона $U2$, а разрядный ток конденсатора $C3$ включает оптрон $U4$ и тиристор $VS2$, обеспечивающий подачу питающего импульса в обмотку ЛЭМД. Время t_{TP} и ток i_{TP} трогания, нагруженного противодействующим усилием ЭМУ якоря, возрастают, увеличивая значение запасенной магнитной и механической энергии A_y ЛЭМД. Для повторения цикла работы преобразователя и импульсного ЛЭМД следует отпустить и вновь нажать кнопку SB .

Режим непрерывных ходов якоря линейного двигателя сводообрушителя реализуется замыканием контакта SA при нажатой кнопке SB . В этом случае вентиль $VD5$ обеспечивает регулярную подзарядку конденсатора $C2$ через резисторы $R8 \div R11$ даже при разомкнутых контактах 1-2 SB .

Постоянная времени $(R8 + \dots + R11)C2 = \tau$ определяет интенсивность подзарядки и, следовательно, частоту n ходов якоря ЛЭМД ударной машины, которую регулируют резистором $R11$.

Регулирующие и стабилизирующие свойства преобразователя определяются следующим образом.

И нагружающее якорь усилие ЭМУ, и механическая энергия A_y в цикле энергопреобразования ЛЭМД зависят от среднего значения напряжения U , питающего обмотку импульса, которое определяется углом управления α тиристоров $VS1$, $VS2$, зависящим от момента включения транзистора VT ФИ, задаваемого вручную переменным резистором $R3$ [195]:

$$U = (2/\pi)U_M((1 + \cos \alpha)/2) \quad (\text{П4.1})$$

где U_M – амплитуда напряжения сети.

Кроме того, охват базовых цепей транзистора VT обратной связью по напряжению сети за счет делителя на резисторах $R1$, $R6$ делает этот угол частично обратным зависимым от изменений напряжения сети. Выразив продолжительность заряда времязадающего конденсатора $C1$ через значение α и параметры элементов схемы релаксационного генератора, определим угол управления [195]

$$\alpha = \frac{360}{T}(R3 + R5)C1 \ln \frac{U_{ИП} - U_{ВЫКЛ}}{U_{ИП} - \eta R6 \frac{U_{ИП} R1 + u_C R4}{R1 R6 + R1 R4 + R4 R6}}, \quad (\text{П4.2})$$

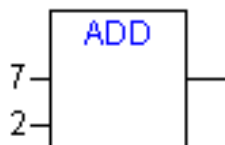
где T – период напряжения сети; $U_{ИП}$ – напряжение питания релаксационного генератора; $U_{ВЫКЛ}$ – напряжение выключения транзистора; η – коэффициент передачи VT ; u_C – мгновенное значение напряжения сети.

Соотношение (П4.2) позволяет предварительно оценивать регулировочные и стабилизирующие свойства преобразователя. В частности, в [195] получено, что коэффициент стабилизации ФИ с обратной связью по напряжению сети возрастает, в зависимости от глубины обратной связи, в 2-3 раза по сравнению с формирователем без обратной связи. Среднее значение напряжения питающих импульсов регулируется в диапазоне $0,1 \div 0,97$ и вполне соответствует требованиям практики.

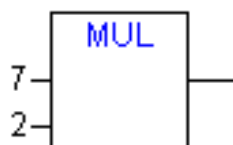
П.5 Библиотека функциональных блоков CoDeSyS

П5.1 Арифметические операторы

ADD – Сложение переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

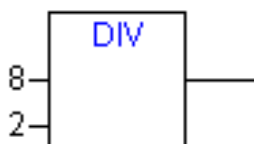


MUL – Перемножение значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.



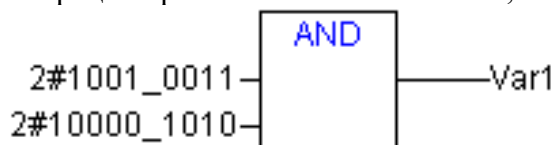
SUB – Вычитание значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

DIV – Деление значений переменных типов: BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL и LREAL.

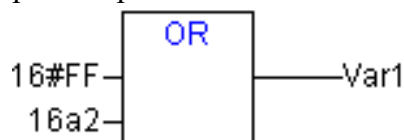


П5.2 Битовые операторы

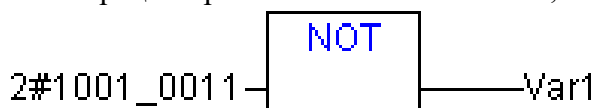
AND – Побитное **И**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



OR – Побитное **ИЛИ**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



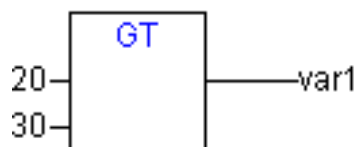
NOT – Побитное **НЕ**. Операция применима к типам BOOL, BYTE, WORD или DWORD.



П5.3 Операторы сравнения

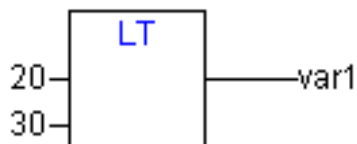
GT – Больше. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра больше второго.



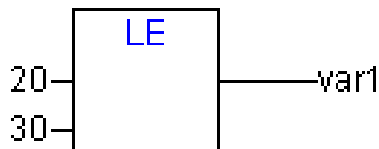
LT – Меньше. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра меньше второго.



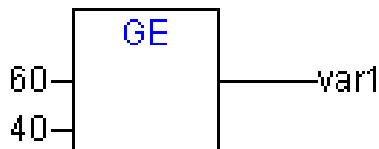
LE – Меньше или равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра меньше или равно второму.



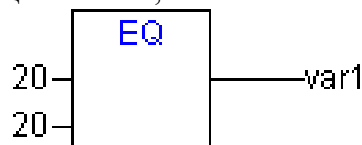
GE – Больше или равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра больше или равно второму.



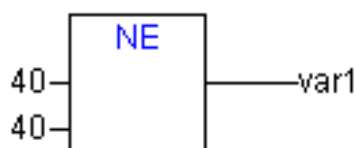
EQ – Равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра равно второму.



NE – Не равно. Операнды могут быть типов BOOL, BYTE, WORD, DWORD, SINT, USINT, INT, UINT, DINT, UDINT, REAL, LREAL, TIME, DATE, TIME_OF_DAY, DATE_AND_TIME и STRING.

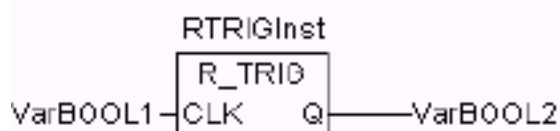
Двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра не равно второму.



П5.4 Детекторы импульсов

Функциональный блок **R_TRIG** генерирует импульс по переднему фронту входного сигнала.

Выход Q равен FALSE до тех пор, пока вход CLK равен FALSE. Как только CLK получает значение TRUE, Q устанавливается в TRUE. При следующем вызове функционального блока выход сбрасывается в FALSE. Таким образом, блок выдает единичный импульс при каждом переходе CLK из FALSE в TRUE.



Функциональный блок **F_TRIG** генерирует импульс по заднему фронту входного сигнала.

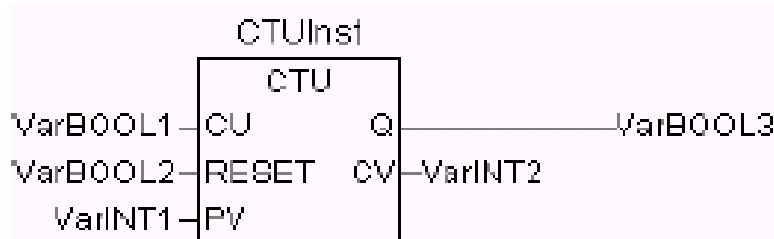
Выход Q равен FALSE до тех пор, пока вход CLK равен TRUE. Как только CLK получает значение FALSE, Q устанавливается в TRUE. При следующем вызове функционального блока выход сбрасывается в FALSE. Таким образом, блок выдает единичный импульс при каждом переходе CLK из TRUE в FALSE.



П5.5 Счетчики

CTU – Функциональный блок «инкрементный счетчик».

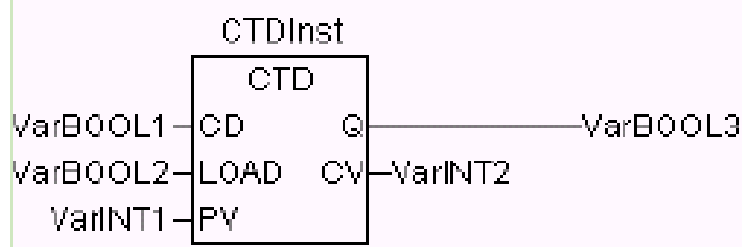
Входы CU, RESET и выход Q типа BOOL, вход PV и выход CV типа WORD. По каждому фронту на входе CU (переход из FALSE в TRUE) выход CV увеличивается на 1. Выход Q устанавливается в TRUE, когда счетчик достигнет значения заданного PV. Счетчик CV сбрасывается в 0 по входу RESET = TRUE.



CTD – Функциональный блок «декрементный счетчик».

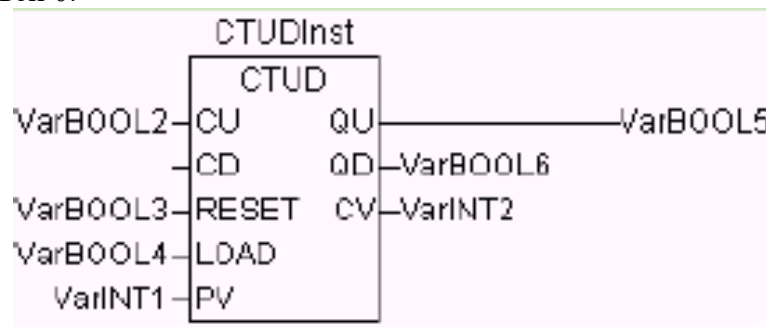
Входы CD, LOAD и выход Q типа BOOL, вход PV и выход CV типа WORD. По каждому фронту на входе CD (переход из FALSE в TRUE) выход CV уменьшается на 1. Когда счетчик

достигнет 0, счет останавливается, выход Q переключается в TRUE. Счетчик CV загружается начальным значением, равным PV по входу LOAD = TRUE.



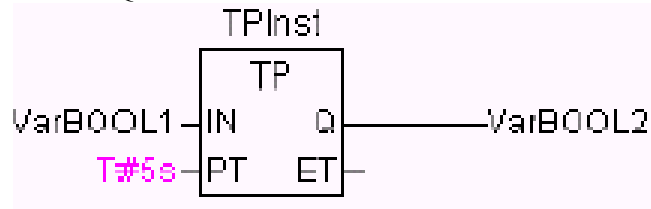
CTUD – Функциональный блок «инкрементный/декрементный счетчик».

Входы CU, CD, RESET, LOAD и выходы QU и QD типа BOOL, PV и CV типа WORD. По входу RESET счетчик CV сбрасывается в 0, по входу LOAD загружается значением PV. По фронту на входе CU счетчик увеличивается на 1. По фронту на входе CD счетчик уменьшается на 1 (до 0). QU устанавливается в TRUE, когда CV больше или равен PV. QD устанавливается в TRUE, когда CV равен 0.



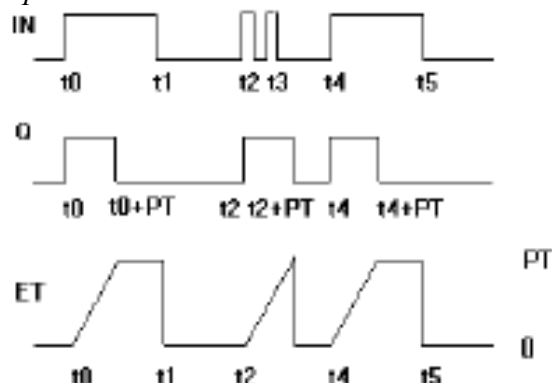
П5.6 Таймеры

TP – Функциональный блок «таймер». TP(IN, PT, Q, ET) Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.

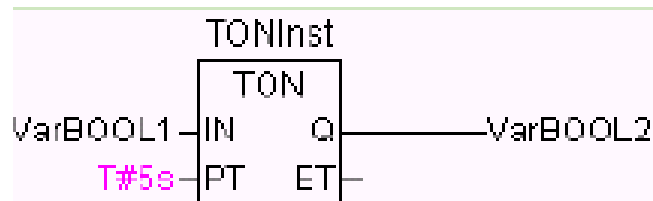


Пока IN равен FALSE, выход Q = FALSE, выход ET = 0. При переходе IN в TRUE выход Q устанавливается в TRUE и таймер начинает отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET до достижения длительности, заданной PT. Далее счетчик не увеличивается. Таким образом, выход Q генерирует импульс длительностью PT по фронту входа IN.

Временная диаграмма работы TP:

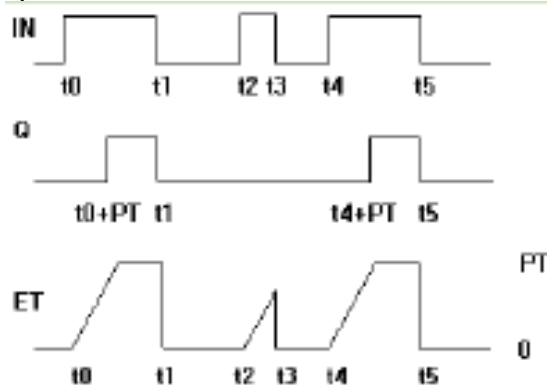


TON – Функциональный блок «таймер с задержкой включения». TON(IN, PT, Q, ET)
Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.

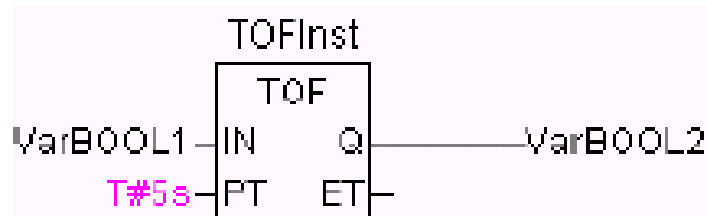


Пока IN равен FALSE, выход Q = FALSE, выход ET = 0. Как только IN становится TRUE, начинается отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET до значения, равного PT. Далее счетчик не увеличивается. Q равен TRUE, тогда IN равен TRUE и ET равен PT, иначе FALSE. Таким образом, выход Q устанавливается с задержкой PT от фронта входа IN.

Временная диаграмма работы TON:

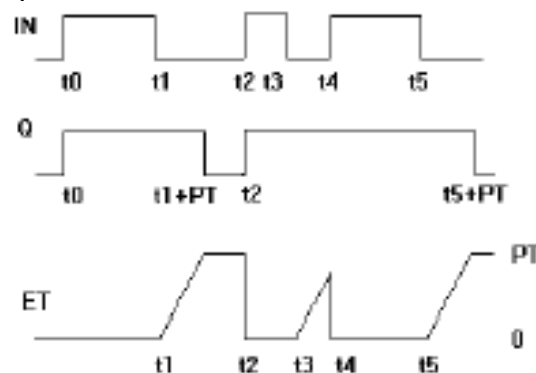


TOF – Функциональный блок «таймер с задержкой выключения». TOF(IN, PT, Q, ET)
Входы IN и PT типов BOOL и TIME соответственно. Выходы Q и ET аналогично типов BOOL и TIME.



Если IN равен TRUE, то выход Q = TRUE и выход ET = 0. Как только IN переходит в FALSE, начинается отсчет времени (в миллисекундах) на выходе ET. При достижении заданной длительности отсчет останавливается. Выход Q равен FALSE, если IN равен FALSE и ET равен PT, иначе - TRUE. Таким образом, выход Q сбрасывается с задержкой PT от спада входа IN.

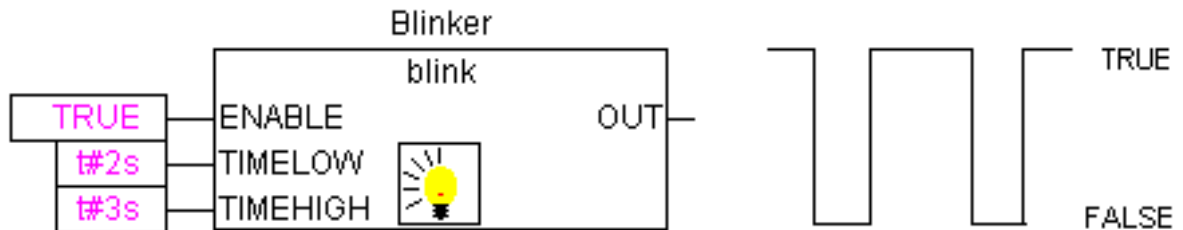
Временная диаграмма работы TOF:



П5.7 Генератор сигналов

BLINK – Функциональный блок «генератор прямоугольных импульсов». Входы: ENABLE типа BOOL, TIMELOW и TIMEHIGH типа TIME. Выход OUT типа BOOL.

Генератор запускается по входу ENABLE = TRUE. Длительность импульса задается TIMEHIGH, длительность паузы TIMELOW. При переходе ENABLE в FALSE, выход OUT остается в том состоянии, в котором он был в этот момент.



Устройство преобразования электрических сигналов линейного электромагнитного двигателя

Правильное измерение временного интервала T прохождения разогнавшимся якорем мерного участка $\Delta l \ll \delta$, являющегося конструктивным параметром датчика, обеспечивается, если исключено влияние «дребезга» его контактов на частотомер. Для этого разработано и применялось специальное устройство преобразования электрических сигналов, представленное на рис.П6.1. В отличие от рассмотренного в работе [195], предлагаемое устройство выполнено без применения цифровых микросхем, допускает питание выпрямленным несглаженным напряжением и представляется простым и функциональным.

На рис.П6.1 показаны временные диаграммы, электрическая схема блока и его соединения с ЛЭДМ и контактным датчиком при измерении предударной скорости V_y якоря. Схема содержит два формирователя импульсов – начала (ФИП) и окончания (ФИС) счета времени T , и интегратор (И) [196].

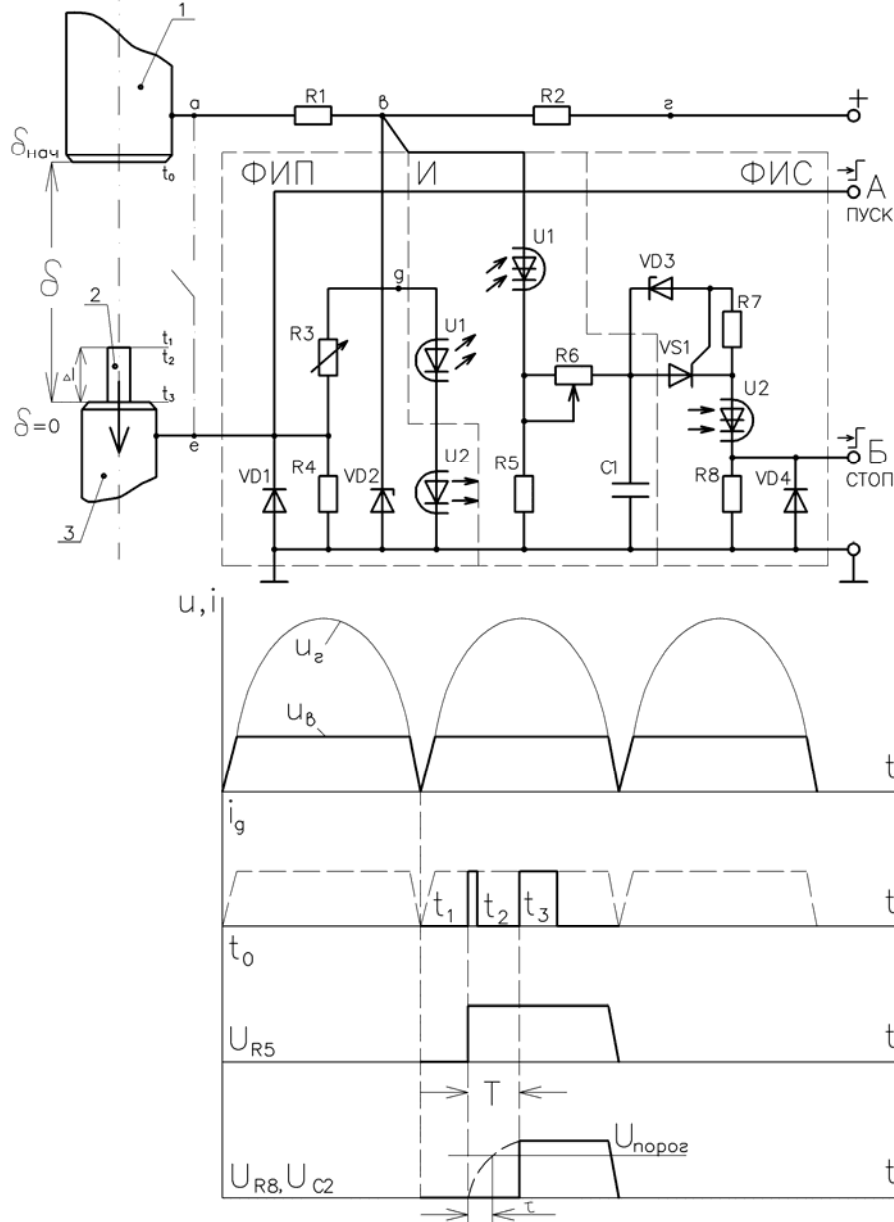


Рис.П6.1 – Электрическая схема и временные диаграммы устройства преобразования электрических сигналов

Работа устройства представляется следующим образом. В момент t_1 соприкосновения якоря ЛЭМД и соединенного в исходном состоянии с корпусом датчика 3 подвижного стрежня 2 возникающий в т. е кратковременный положительный всплеск напряжения запускает передним фронтом частотомер (вход А), который начинает отсчет времени, и импульсно засвечивает светодиоды оптронов $U1$, $U2$. Открывшийся при этом фототиристор $U1$ подает напряжение на интегрирующую цепочку $R6C1$, однако незаряженный конденсатор $C1$ и запертый тиристор $VS1$ с пороговым элементом $VD3$ пока запрещают формирование останавливающего частотомер импульса (вход Б) даже при засвеченном фототиристоре $U2$.

В последующий момент t_2 перемещаемый якорем 1 внутрь корпуса 3 (по стрелке) подвижный стержень 2 теряет гальванический контакт с этим корпусом. На интервале Δl начавшегося совместного движения якоря 1 и стержня 2 положительное напряжение в т. е, и излучение светодиодов $U1$, $U2$ отсутствуют, но через открытый фототиристор $U1$ продолжается заряд конденсатора $C1$ интегрирующей цепи, определяемый ее постоянной времени $\tau \approx R6C1$. Значение τ задается характерной продолжительностью «дребезга» соударяющихся элементов 1, 2. При этом, для нормальной работоспособности устройства необходимо, чтобы время τ_1 заряда конденсатора $C1$ до напряжения «пробоя» порогового элемента $VD3$ и измеряемый временной интервал T для участка движения Δl определялись соотношением $\tau_1 \approx 3\tau \approx (0,2 \div 0,4)T$.

В момент t_3 якорь 1 ЛЭМД, полностью вдавив стержень 2 в корпус 3, производит по нему удар, стержень опять обретает электрический контакт с корпусом. Вновь импульс положительного напряжения в т. е засвечивает светодиоды оптронов $U1$, $U2$. Заряженный к этому моменту до напряжения $U_{C1} > U_{порог\ VD3}$ конденсатор $C1$ отпирает тиристор $VS1$ и, разряжаясь по цепи $C1 - VS1 - U2 - R8 - C1$, формирует на резисторе $R8$ импульс напряжения, передний фронт которого останавливает отсчет времени (вход Б). Интервал $T = (t_3 - t_1) + \Delta t$, зафиксированный частотомером, определит предупредительную скорость якоря $V_y = \Delta l / T$.

В сравнении с рассмотренным в [196], предлагаемое устройство обладает большей инерционностью, определяемой суммарным временем включения тиристора $VS1$ и оптрона $U2$: $\Delta t = t_{вкл\ VS1} + t_{вкл\ U1}$. Однако его быстродействие остаётся высоким по сравнению со скоростью протекающих в ЛЭМД процессов. Для характерных значений $t_{вкл\ VS1} \leq 2\text{ мкс}$ (КУ101Е), $t_{вкл\ U2} \leq 10\text{ мкс}$ (30У103) и измеряемого интервала $T = 0,8 \dots 1,2$ мс вносимая относительная за-

держка $\frac{\Delta t}{T} = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 0,01$ оказывается очень небольшой и увеличение погрешности измерения незначительным.

Установка настроечных параметров индикатора R320

1. *Вход в режим:* нажать и удерживать клавиши «POWER» и «ZERO» одновременно (рис.П7.1) до появления на дисплее «SAFE». При сообщении «BILD» – индикатор в режиме настроек. Клавиша «ZERO» – выполняет функцию смены групп настроек. «TARE» – функция смены пунктов настроек параметров. «GROSS/NET» – вход в редактирование пункта. «PRINT» – выбор параметра. «F» – подтверждение установок параметра.
2. *Выход из режима установок:* нажимать «ZERO» несколько раз до «END» и подтвердить «F».
3. *Режим программирования:* выполняется по табл.П7.1



Рис.П7.1. – Передняя панель индикатора

Подключение индикатора R320 к ПК

1. *Подключение индикатора.* Можно использовать следующие типы соединений: RS-232; и opto-LINK.

Соединение RS-232. Для подключения соединения RS-232 необходим последовательный соединительный кабель (рис.П7.2).

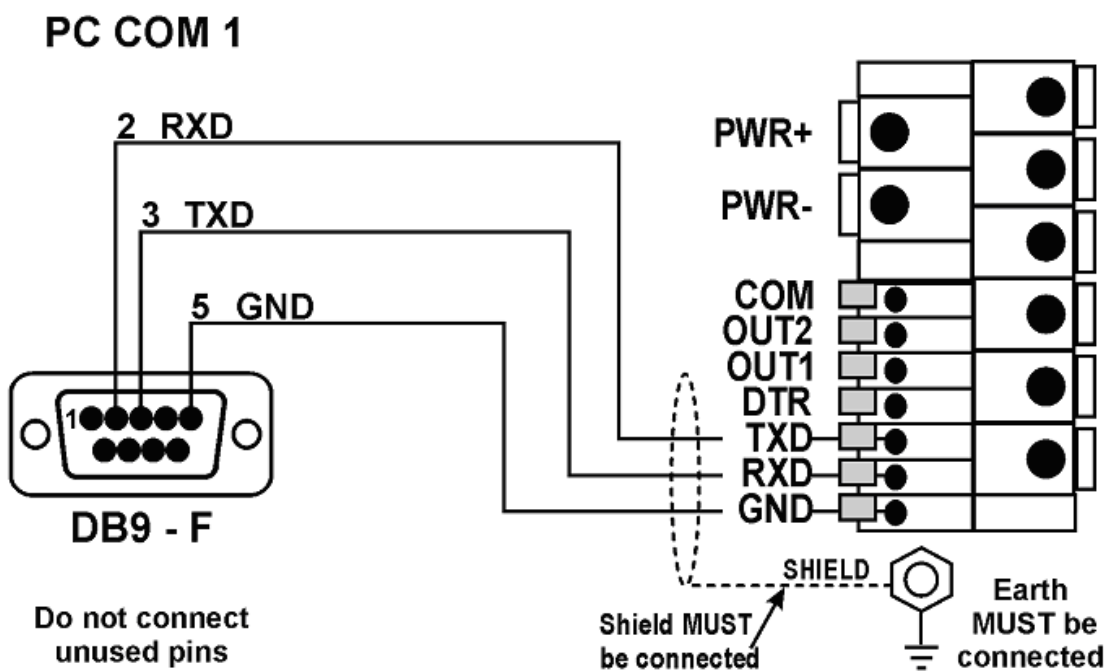


Рис.П7.2 – Схема подключения индикатора к ПК

Табл.П7.1

«ZERO»	«TARE»	«GROSS/NET»	«PRINT»	«F»
BUILD	DP, CAP,	Режим программирования	Режим программирования	
	RES,			
	UNITS,			
	HI.RES,			
	CABLE			
OPTION	USE	Режим программирования	Режим программирования	
	FILTER	Время считывания показаний (фильтрация), сек	Мгновенно (none), 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0	Ввод
	MOTION	Режим программирования	Режим программирования	
	INIT.Z	Ограничение обнуления	Вкл.(ON), выкл.(OFF)	Ввод
	Z.TRAC	Режим программирования	Режим программирования	
	Z.RANGE			
	Z.BAND			
CAL	ZERO	Режим программирования	Режим программирования	
	SPAN			
	ED.LIN			
	CLR.LIN			
	DIR.LIN			
	DIR.SPN			
	FAC.LIN			
SPEC	SAFE.PC	Режим программирования	Режим программирования	
	FUL.PC	Режим программирования	Режим программирования	
	KEY.LOC	Блокировка клавиш	P12345 – номера клавиш	Ввод
	KEY.FN	Установка функции клавиши «F»	NONE, COUNT, HOLD, LIVE.WT, TEST, UNITS, PEAK.H, SHOW.T	Ввод
	AUT.OFF	Функция автовыключения	NEVER (автовык. откл.)	Ввод
	B.LIGHT	Подсветка дисплея	OFF, ON	Ввод
SERIAL	TYPE	Способ передачи данных	NET, AUTO, SINGLE, PRINT, AUTO.PR	Ввод
	FORMAT	Формат передачи данных	GAster, CUSTOM, FMT.1, FMT.2	Ввод
	BITS	Скорость передачи данных	2400/4800/9600	Ввод
	ADDRES	Количество адресов	От 01 до 31	Ввод
	RST.CON	Режим программирования	Режим программирования	
SET.PTS	SET.PT.1	Установка момента срабатывания	OFF (выкл.), ON (при вкл.), OVER (выше значения), MOTION (при изменении), ZERO (при нулевых), NET (при тарировании)	Ввод
CLOC	Установка параметров времени (год, месяц, день и т.д.)			
TEST	SCALE	Тестирование	Сигнал датчика в мV/V	Ввод
FACTRY	DEFTL	Режим программирования	Режим программирования	
END	EXIT SETUB	Режим установок параметров завершен	«F» – выход в основной режим	Ввод

После, того как соединили индикатор с ПК, включается индикатор и запускается программа "VIEW300". Нажмите на кнопку  **Connect** на панели инструментов, чтобы установить подключение. Бод, четность, информационные разряды, стоповые биты должны иметь те же самые значения, что и в установках индикатора (значение по умолчанию: 9600, N, 8,1). *Unit Address* (адрес модуля): может быть установлено "Any" если сетевой адрес не известен. Иначе настройки должны соответствовать адресу устройства. Когда эти настройки выставлены, нажмите **"OK"** для соединения. Если соединение установлено показания появятся на мониторе.

2. *Диаграмма измерений.* Подключите индикатор. Нажмите на закладку **"Log"** под панелью инструментов. Нажмите **"Start"**. Установите частоту и любой необходимый числовой интервал измерений. Нажмите **"OK"**. Регистрация началась. Когда собрано достаточно данных нажмите **"Stop"**.

В любое время можно увеличить или уменьшить, или переместить окно представления, чтобы просмотреть предыдущие данные. Возможно, также узнать время и измерение в любой точке. Существует два способа:

Абсолютное измерение: Абсолютные время и измерение любой точки;

Различное измерение: Разница времени и измерения между любыми 2 точками. Размер диаграммы может быть изменен при помощи опции "Setup Chart" в меню "Edit".

Данные могут быть загружены или сохранены при помощи клавиш  **Open** и  **Save** на панели инструментов. Убедитесь, что тип файла "Log (*.CSV)". Регистрационные данные могут быть распечатаны: выберите **"Print"** в меню **"File"**.

3. *Сохранение и восстановление параметров и данных.* «View300» позволяет использовать параметры, загруженные с индикатора, изменять и устанавливать на индикатор. Эти параметры могут быть также сохранены в файл и загружены для использования позднее.

- *Чтение параметров с индикатора.* Подключите индикатор. Нажмите  **Read Settings** на панели инструментов. Параметры могут быть рассмотрены (и изменены) пользователем.
- *Запись параметров в индикатор.* Подключите индикатор. После того, как параметры были загружены из файла или считаны с индикатора и изменены, они могут быть записаны обратно в индикатор нажатием на клавишу  **Write Settings** на панели инструментов.
- *Сохранение параметров в файл.* После того, как параметры были загружены из файла или считаны с прибора, они могут быть сохранены в файл нажатием на клавишу  **Save** на панели инструментов. Убедитесь, что тип файла "Settings (*.RIS)" и введите имя файла. Нажмите **"Save"**.
- *Загрузка параметров из файла.* Параметры, которые были ранее сохранены в файл, могут быть загружены нажатием на клавишу  **Open** на панели инструментов. Проверьте тип файла "Settings (*.RIS)" и выберите нужный файл, а затем нажмите **"Open"**. Параметры могут быть изменены пользователем.
- *Сохранение диаграммы в файл.* После того, как сбор данных были закончены, данные могут быть сохранены в файл для более позднего рассмотрения. Нажмите  **Save** на панели инструментов. Убедитесь, что тип файла "Log (*.CSV)" и введите имя файла, а затем нажмите **"Save"**.
- *Загрузка диаграммы из файла.* Диаграммы, которые были предварительно сохранены в файл, могут быть загружены нажатием на клавишу  **Open** на панели инструментов. Убедитесь, что тип файла "Log (*.CSV)" и выберите нужный файл. Нажмите **"Open"**.
- *Сохранение параметров базы данных.* Подключите индикатор. Выберите **"Save Database Settings"** в меню **"Instrument"**. Выберите **".RID"** файл, чтобы сохранить параметры.
- *Восстановление параметров базы данных.* Убедитесь, что индикатор подключен. Выберите **"Restore Database Settings"** в меню **"Instrument"**. Выберите **".RID"** файл с требуемой базой данных.

4. *Основное окно.* Основное окно содержит несколько разделов: Главное меню. Панель инструментов. Страница закладок. Display. Setting. Calibration. Log. Test. Строка состояния

- *Главное меню.* Главное меню находится вверху окна и содержит следующие элементы:
- *-File:*  **Open**–Открыть предварительно сохраненные параметры или файл диаграммы;  **Save**–Сохранить текущие параметры или диаграмму в файл;  **Connect**–Подключение к индикатору; **Print**–Печать текущих параметров или данных; **Exit**–Выход из программы.
- *-Edit:* **Setup chart**–Изменение параметров диаграммы.
- *-Instrument:*  **Read Settings**–Считать параметры с индикатора;  **Write Settings**–Записать параметры на индикатор.
- *Панель инструментов:*  **Open**–Открыть предварительно сохраненные параметры или файл регистрационных данных;  **Save**–Сохранить текущие параметры или регистрационные данные в файл;  **Connect**–Подключение к индикатору;  **Read Settings**–Считать параметры с индикатора;  **Write Settings**–Записать параметры на индикатор.
- *Страница закладок:* **Display** (дисплей) – используется для отображения показаний и функциональных возможностей индикатора. После того, как подключение произошло, “viewer” выбирает соответствующее изображение, которое соответствует индикатору. **Settings** (параметры) – используется для изменения конфигурации установок подключенного индикатора. Эта страница доступна только, когда индикатор подключен и был использован  **Read Settings** для передачи параметров с индикатора. Также можно загрузить параметры из сохраненного ранее файла через  **Open**. Эти параметры потом могут быть изменены и записаны на индикатор, используя  **Write Settings** или сохранены обратно на диск, используя  **Save**. **Calibration** (калибровка) – используется для выполнения калибровки. Доступна только, когда индикатор подключен и был использован  **Read Settings** для передачи параметров с индикатора. **Log** (диаграмма данных) – используется для построения диаграммы. Данные сохраняются в стандарте .CSV (comma separated variable), файлы которых могут читаться другим программным обеспечением типа Microsoft Excel. **Test** – используется для отправки и получения команд коммуникации. **Строка состояния** отображает данные, посылаемые и полученные от индикатора.

5. *Закладка Display.* Закладка **Display** отображает переднюю панель индикатора. Когда индикатор подключен, то при нажатии на клавиши с помощью мыши, изображенные на передней панели, имеют те же действия как при нажатии на клавиши непосредственно на индикаторе.

6. *Закладка Settings (параметры)*

На закладке **Settings** есть дополнительные закладки, которые соответствуют непосредственно группам параметров индикатора:

Группа Build

- Full Scale Capacity: Наибольший предел взвешивания (НПВ).
- Resolution: Выбор дискретности.
- Decimal Point: Количество знаков после запятой.
- Units: Выбор единицы массы.
- Cable: Количество проводов электронного индикатора.
- High Resolution (x10): Увеличение разрешения в 10 раз

Группа Option

- Use: Пользовательские режимы.
- Filter: Время считывания показаний (фильтрация), сек. «None» - мгновенно.
- Motion: Стабильность (допустимое число изменений показаний), кол-во/сек.
- Initial Zero: Ограничение возможности обнуления дисплея (до $\pm 10\%$ НПВ)
- Zero Tracking: Трекинг ноля (чувствительность в околонулевой зоне).
- Zero Range: Допустимый рабочий нулевой диапазон, %.
- Zero band: Установка диапазона, в котором значения будут отображаться на дисплее как нулевые (на дисплее будет гореть индикатор «ZERO BAND»).

Группа Special. Контроль дополнительных опций.

Группа Serial

- Type: Установка способа передачи данных.

- Address: Количество адресов подключенных устройств.

Грунна Setpoint

- Source: (NETTO,GROSS и PCS).
- Target High: Установка верхней границы показаний.
- Target Low: Установка нижней границы показаний.

Грунна Clock

- Date Format: Выбор формата записи даты.
- Set Date/Time: Копирование даты и времени с компьютера.

7. *Закладка Calibration* (калибровка)

На закладке **Calibration** можно откалибровать индикатор:

- *Preparation* (подготовка). Чтобы подготовить индикатор к калибровке необходимо выполнить следующее: 1) Подключите индикатор. 2) Считывание параметров: перед выполнением любой калибровки, необходимо считать все параметры с индикатора и убедиться, что индикатор правильно настроен. Чтобы считать параметры, нажмите  **Read Settings** на панели инструментов. Проверка/Изменение параметров: зайдите на закладку **"Settings"** (которая теперь должна быть доступна). Проверьте параметры и сделайте необходимые изменения. Обратите особое внимание на группы **"Build"** и **"Option"**. 3) Запись параметров на индикатор: Нажмите  **Write Settings** на панели инструментов для записи обновленных параметров на индикатор.
- *Калибровка ноля*. После подготовки индикатора перейдите на закладку **"Calibration"**.
- *Сохранение калибровки*. Настройки калибровки обычно сохраняются автоматически, но чтобы параметры были установлены должным образом, необходимо нажать  **Write Settings** на панели инструментов.

8. *Закладка Log* (диаграмма) позволяет считывать данные вместе с 4 отдельными интервалами взвешивания. Запуск: Подключите индикатор. Перейдите на закладку **"Log"**. Нажмите **"Start"**. Выберите частоту в **"Sample Rate"** и выберите 4 интервала измерения. Нажмите **"OK"**. Для остановки нажмите **"Stop"**. Масштаб диаграммы может быть изменен при помощи опции **"Setup Chart"** в меню **"Edit"**.

Измерение. Получение времени и измерения в нужной точке: Установите курсор мыши в нужной точке. Удерживая клавишу <SHIFT>, щелкните левой кнопкой мыши. Показания времени и измерения отобразятся внизу диаграммы.

9. *Настройка диаграммы*

Произвести настройку диаграммы можно при помощи опции **"Setup Chart"** в меню **"Edit"**. Есть пять параметров, которые могут быть установлены: *Start Time*, *End Time*, *Min Weight*, *Max Weight*, *Comment*. Кнопка **"Auto"** устанавливает наибольший масштаб диаграммы.

10. *Закладка Test* обеспечивает связь с индикатором. Команды могут быть введены непосредственно в строку редактирования в верхней части закладки. Нажмите **"Send"** или <ENTER> для отправки команды на индикатор.

Табл.П8.1 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	C, Ф	U, В	z, Н/м	Энергия ударов, А _у , Дж	Среднее значение, А _у , Дж	σ	K_{σ}	μ
1	0,01	50	500	6,5 5,7 6,3	6,1667	0,442	0,072	1,327
2	0,13	50	500	26 25 26	25,67	0,389	0,015	1,167
3	0,01	120	500	30 28 28	18,667	0,0556	0,0019	0,1667
4	0,13	120	500	172 170 174	172	0,833	0,0048	2,5
5	0,01	50	1100	20 18 18	18,67	0,06	0,0012	0,17
6	0,13	50	1100	13 13 15	13,67	0,056	0,004	0,167
7	0,01	120	1100	24 24 25	24,333	0,389	0,016	1,17
8	0,13	120	1100	148 144 146	146	0,833	0,006	2,5
9	0,07	85	800	44 46 44	44,667	0,056	0,001	0,167
10	0,13	85	800	85 86 84	85	0,167	0,002	0,5
11	0,01	85	800	12 13 12	12,333	0,389	0,032	1,1667
12	0,07	120	800	95 95 97	95,667	0,0556	0,00058	0,167
13	0,07	50	800	16 17 15	16	0,167	0,01042	0,5
14	0,07	85	1100	45 43 42	45,33	0,27	0,0064	0,833
15	0,07	85	500	48 50 50	49,3	0,056	0,00413	1,1667

Табл.П8.2 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	С, Ф	U, В	z, Н/м	Частота ударов, п _у , об/мин	Среднее значение, п _у , об/мин	σ	K_{σ}	μ
1	0,01	50	500	47 45 45	45,67	0,056	0,00122	-0,16667
2	0,13	50	500	190 186 197	191	9,83	0,051483	29,5
3	0,01	120	500	88 93 90	90,33	1,61	0,017835	4,83
4	0,13	120	500	255 248 250	251	3,83	0,015272	11,5
5	0,01	50	1100	400 394 396	396,67	2,61	0,006583	7,833
6	0,13	50	1100	590 600 598	601	8,83	0,014821	26,5
7	0,01	120	1100	514 512 520	515,33	5,278	0,010241	15,83
8	0,13	120	1100	730 733 728	730,33	1,61	0,002206	4,83
9	0,07	85	800	300 306 305	303,67	2,944	0,009696	8,833
10	0,13	85	800	447 450 455	450,67	4,94	0,010971	14,8
11	0,01	85	800	301 292 294	295,7	8,278	0,028029	24,83
12	0,07	120	800	342 344 349	345	3,83	0,01	11,5
13	0,07	50	800	252 256 256	254,667	1,27	0,005017	3,83
14	0,07	85	1100	500 502 496	499,33	2,611	0,005229	7,83
15	0,07	85	500	93 92 100	95	5,83	0,061404	17,5

Табл.П8.3 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	C, Ф	U, В	z, Н/м	КПД	Среднее зна- чение КПД	σ	K_{ϵ}	μ
1	0,01	50	500	19 20 19	19,33	0,389	0,02	1,167
2	0,13	50	500	11 13 13	12,33	0,056	0,005	0,17
3	0,01	120	500	16 15 16	15,67	0,388	0,0245	1,1667
4	0,13	120	500	8 7 7	7,33	0,39	0,053	1,2
5	0,01	50	1100	4 4 5	4,33	0,4	0,09	1,17
6	0,13	50	1100	12 11 11	11,33	0,389	0,034	1,167
7	0,01	120	1100	12 12 11	11,67	0,41	0,033	1,18
8	0,13	120	1100	18 16,5 17	17,17	0,306	0,018	0,917
9	0,07	85	800	27 27 26	26,67	0,389	0,015	1,21
10	0,13	85	800	20 19 21	20	0,167	0,08	0,5
11	0,01	85	800	20 19 20	19,67	0,364	0,02	1,167
12	0,07	120	800	24 24 23	23,7	0,412	0,0164	1,175
13	0,07	50	800	22 22 23	22,3	0,392	0,0174	1,82
14	0,07	85	1100	20 21 20	20,3	0,387	0,0191	0,958
15	0,07	85	500	26 25 25	25,33	0,431	0,0154	1,23

Табл.П8.4 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	$C, 10^{-3}\Phi$	U, В	r'	$F_{T,H}$	Среднее значение $F_{T,H}$	σ	K_{σ}	μ
1	2,75	90	0,1	75 78 80	77,6	1,6	0,02	4,833
2	12,75	90	0,1	400 412 405	405,6	11,6	0,0286	34,833
3	2,75	240	0,1	500 489 488	492,3	14,28	0,029	42,833
4	12,75	240	0,1	1600 1590 1610	1600	32,8	0,021	98,5
5	2,75	90	0,7	60 61 62	61	0,17	0,0002	0,5
6	12,75	90	0,7	220 223 220	221	0,5	0,00226	1,5
7	2,75	240	0,7	340 340 346	342	3,5	0,0102	10,5
8	12,75	240	0,7	1000 1020 1015	1011,6	35,61	0,035	106,8
9	7,5	165	0,4	610 615 615	613,3	2,28	0,0037	6,833
10	12,75	165	0,4	1200 1205 1198	1201	3,83	0,003	11,5
11	2,75	165	0,4	300 310 305	305	7,83	0,026	23,5
12	7,5	240	0,4	1150 1155 1148	1151	3,83	0,0033	11,5
13	7,5	90	0,4	290 296 296	294	3,5	0,0119	10,5
14	7,5	165	0,7	330 330 332	330,6	0,056	0,00017	0,16667
15	7,5	165	0,1	450 445 448	447,6	1,6	0,0036	4,833

Табл.П8.5 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	$C, 10^{-3}\Phi$	U, В	r'	Частота хо- дов якоря $n, \text{мин}^{-1}$	Среднее значение $n, \text{мин}^{-1}$	σ	K_e	μ
1	2,75	90	0,1	370 365 372	369	3,833	0,0104	11,5
2	12,75	90	0,1	280 286 278	281,3	5,2778	0,0188	15,833
3	2,75	240	0,1	350 351 352	351	0,1667	0,0005	0,5
4	12,75	240	0,1	240 245 241	242	1,833	0,008	5,5
5	2,75	90	0,7	410 416 409	411,7	4,278	0,01	12,83
6	12,75	90	0,7	306 308 310	308	0,8333	0,0027	2,5
7	2,75	240	0,7	380 382 386	382,7	2,611	0,0068	7,833
8	12,75	240	0,7	256 259 250	255	6,5	0,025	19,5
9	7,5	165	0,4	331 330 328	329,7	0,27778	0,00084	0,8333
10	12,75	165	0,4	275 272 277	274,7	1,611	0,006	4,833
11	2,75	165	0,4	355 355 359	356,3	1,278	0,004	3,833
12	7,5	240	0,4	320 322 326	322,7	2,6111	0,00809	7,833
13	7,5	90	0,4	300 300 303	301	0,5	0,00166	1,5
14	7,5	165	0,7	320 322 324	322	0,8333	0,00259	2,5
15	7,5	165	0,1	350 355 351	352	1,8333	0,00521	5,5

Табл.П8.6 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	$C, 10^{-3}\Phi$	U, В	r'	КПД $\eta, \%$	Среднее значение $\eta, \%$	σ	K_{σ}	μ
1	2,75	90	0,1	29,9 29,7 30	29,87	0,492	0,016	1,477
2	12,75	90	0,1	22,3 22,5 22,1	22,3	0,487	0,022	1,46
3	2,75	240	0,1	25,1 25,3 25	25,13	0,492	0,0196	1,477
4	12,75	240	0,1	17,5 17,2 17,5	17,4	0,49	0,03	1,47
5	2,75	90	0,7	22 22,3 22,3	22,2	0,4966	0,0221	1,48
6	12,75	90	0,7	24,9 25 25,1	25	0,496	0,0198	1,46
7	2,75	240	0,7	26,8 26,8 27	26,87	0,48	0,018	1,5
8	12,75	240	0,7	29,7 29,5 29,8	29,67	0,47	0,02	1,43
9	7,5	165	0,4	36 36,4 36,5	36,3	0,5	0,013	1,4
10	12,75	165	0,4	28,7 28,9 28,7	28,77	0,477	0,017	1,46
11	2,75	165	0,4	31,5 31,6 32	31,7	0,4788	0,015	1,43
12	7,5	240	0,4	35 35,3 34,8	35,03	0,505	0,0136	1,44
13	7,5	90	0,4	35,1 35,1 35	35,07	0,487	0,01423	1,512
14	7,5	165	0,7	35,8 35,6 36	35,8	0,49	0,01359	1,46
15	7,5	165	0,1	34,6 34,2 34,5	34,43	0,4855	0,0141	1,45

АКТ
производственных испытаний ударного электромагнитного привода для
предотвращения сводообразования сыпучего продукта в металлических
бункерах

В период с 7 сентября по 11 октября 2016 г. ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» предоставил для производственных испытаний в крестьянско-фермерское хозяйство ИП «Глава КФХ «Пасечный Андрей Иванович» р.п. Лысые Горы Саратовской области электромагнитный привод, включающий ударную машину на базе линейного электромагнитного двигателя, систему питания и управления. Руководитель работ – д.т.н., профессор Усанов К.М., исполнители – к.т.н., доценты Каргин В.А. и Волгин А.В.

Сводообрушитель устанавливался на кронштейне на наружной конусной части бункера и включался в работу одновременно с приводом шнекового питателя отбора сыпучего продукта из бункера. В зависимости от настройки, устройство производило 1...3 последовательных удара по стенке бункера с энергией единичного воздействия в диапазоне от 15 до 35 Дж.

Однократное импульсное воздействие ЛЭМД на бункер с энергией 15...35 Дж одновременно с включением питателя обеспечивало равномерное истечение муки, образование сводов и зависаний продукта при этом не отмечалось. Ручное дополнительное включение сводообрушителя не требовалось. Производительность бункерного устройства повысилась, в среднем на 17...22 %.

Установка сводообрушителя на внешней поверхности бункера исключает его взаимодействие с продуктом, загрязнение, обеспечивает соблюдение санитарно-гигиенических норм и требований.

Электромагнитный сводообрушитель имеет минимальное энергопотребление, соответствует требованиям электробезопасности, прост в эксплуатации и обслуживании.

От предприятия:

Глава крестьянско-фермерского
хозяйства Пасечный А.И.



От исполнителя:

Профессор Саратовского ГАУ
д.т.н. Усанов К.М.

Доцент Саратовского ГАУ
к.т.н. Каргин В.А.

Доцент Саратовского ГАУ
к.т.н. Волгин А.В.

АКТ
о внедрении законченной научно-исследовательской,
опытно-конструкторской работы «Интенсификация разгрузки
бункерных устройств применением электромагнитного ударного
привода»

Настоящий акт подтверждает, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Интенсификация разгрузки бункерных устройств применением электромагнитного ударного привода», выполненной на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ исполнителями доцентами Каргиным В.А. и Волгиным А.В., и относящихся к разработке и созданию электромагнитных приводов для предотвращения сводообразования сыпучего продукта в металлических бункерах, переданы в крестьянско-фермерское хозяйство ИП «Глава КФХ «Пасечный Андрей Иванович» р.п. Лысые Горы Саратовской области в виде технической документации в составе рабочих чертежей и опытного образца электромагнитной ударной машины с системой питания и управления.

Разработанный привод позволит повысить производительность бункерного устройства и снизить энергопотребление, улучшить условия труда.

Глава крестьянско-фермерского
хозяйства

Исполнитель НИОКР, к.т.н.,
доцент ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

Исполнитель НИОКР, к.т.н.,
доцент ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ



А.И. Пасечный

В.А. Каргин

А.В. Волгин



ЭлектроСилаМонтаж

общество с ограниченной ответственностью

Тел./факс (многоканальный):
(8452) 57-38-38, 48-28-28
E-mail: esm@elsila-group.ru, www.elsila.ru

Адрес: 410012, г. Саратов, Привокзальная пл., 1
Производ. база: 410071, г. Саратов, ул. Шелковичная, 179

№ 135-А
На № _____ от 29.05.2017

АКТ производственных испытаний и внедрения переносного ударного электромагнитного привода для погружения металлических продольно-неустойчивых стержневых заземлителей в грунт

Производственные испытания проведены в период со 15 по 26 мая 2017 года в организации ООО «ЭлектроСилаМонтаж» г. Саратов.

Испытывался, разработанный на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО Саратовским ГАУ д.т.н., профессором Усановым К.М. и к.т.н., доцентом Каргиным В.А., переносной ударный электромагнитный привод для погружения металлических продольно-неустойчивых стержневых заземлителей в грунт.

Привод содержит ударную машину, выполненную на базе линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД); устройство управления; аккумуляторный источник питания, комплектующийся стартерными аккумуляторами в количестве 4-х штук общим напряжением 48 В.

В процессе испытаний установлено, что ударный привод работоспособен для погружения стержневых заземлителей диаметром 12...18 мм на глубину до 3 м в скальные грунты. Качественные показатели работы ударного комплекса отвечают предъявляемым требованиям: допускают автономную работу на необорудованных электрической сетью площадках, способны погружать цельные продольно-неустойчивые заземлители, а также обеспечивать электробезопасность обслуживающего персонала.

Испытания, в частности показали, что время погружения одного стержневого заземлителя диаметром 12 мм на глубину до трех метров составляет не более 1,5 – 2 минут, что значительно меньше по сравнению со временем забивки ручным копром или кувалдой. Сопротивление растеканию забитого заземлителя соответствовало требованиям ПУЭ.

Ударный привод с линейным электромагнитным двигателем обладает простотой конструкции, надежностью в работе, относительно высокими удельными показателями, компактностью, имеет возможность ручной доставки всех элементов к месту технологического процесса, имеет минимальное, по сравнению с устройствами для торцевой забивки, время подготовки и запуска в работу.

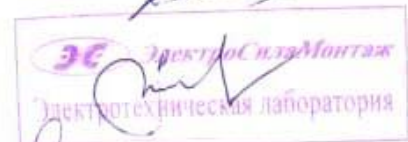
Для проектирования и изготовления переносного ударного электромагнитного привода для погружения металлических продольно-неустойчивых стержневых заземлителей в грунт в ООО «ЭлектроСилаМонтаж» передана документация, которая включает в себя чертежи электромагнитной ударной машины электрическая принципиальная схема системы управления.

При замене традиционных ударных машин, например, с пневмоприводом, для погружения стержней в грунт на привод с линейным электромагнитным двигателем позволит отказаться от пневмосети или компрессора. При этом расчетный годовой экономический эффект от внедрения электромагнитного привода ориентировочно составляет до 120 тыс. рублей на одну бригаду.

От предприятия:

Инженер по наладке и испытаниям, Клюев А.А.

Начальник ЭТЛ
Михайлов А.П.



От исполнителя:

д.т.н., профессор
Усанов К.М.

к.т.н., доцент
Каргин В.А.

общество с ограниченной ответственностью
«МСК ЭНЕРГО»

Юридический адрес :
410033, Саратовская обл., г.Саратов,
ул.Гвардейская, 2А , Литер ПП1, офис 12
Тел. (8 452) 32-20-44

ИНН 6453156511, КПП 64530100
Р/сч 4070281090000000996
К/сч 3010181060000000077
АО «Банк «Агророс» г.Саратов

АКТ
производственных испытаний переносного ударного
электромагнитного привода для погружения металлических
стержневых элементов в грунт

Производственные испытания проведены в период со 01.10 по 05.10.2018 года в организации ООО «МСК ЭНЕРГО» г. Саратова.

Испытывался переносной ударный электромагнитный привод (ЛЭМД-привод) созданный специалистами ФГБОУ ВО Саратовским ГАУ им. Н.И. Вавилова д.т.н., профессором Усановым К.М. и к.т.н., доцентом Каргиным В.А.

Цель испытаний – выяснить техническую возможность и эффективность применения ЛЭМД-привода для погружения металлических стержневых элементов в грунт, использующих, в частности в виде электродов заземления.

В программу испытаний входила механизированная забивка металлических стержневых элементов в грунты различной плотности.

ЛЭМД-привод состоит из электромагнитной ударной машины, устройства управления, аккумуляторного источника питания, емкостного накопителя. Ударная машина включает линейный электромагнитный двигатель со сквозным осевым каналом и зажимным приспособлением для передачи ударного воздействия стержню через его боковую поверхность.

Привод имеет необходимые массогабаритные и энергетические показатели, прост в изготовлении, надежен в работе.

Производственные испытания показали работоспособность созданного переносного ЛЭМД-привода. Время забивки одного стержня диаметром 14 мм и длиной до 2 м в зависимости от плотности грунта составляет 40 – 90 с, что значительно меньше по сравнению со временем забивки ручным способом.

Кроме того, установлено, что механизированная забивка металлических продольно неустойчивых стержней с помощью ЛЭМД-привода обеспечивает уменьшение числа работающих на забивке операторов.

От предприятия:

Директор
Величков Павел Николаевич



Производитель работ
Криволапов Артём Игоревич

От исполнителя:

д.т.н., профессор Усанов
Константин Михайлович

к.т.н., доцент Каргин Виталий
Александрович

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЛЫСОГОРСКАЯ ПТИЦЕФАБРИКА»

412860, Саратовская область
Лысогорский район, р.п. Лысые Горы
ИНН 64/0980729
ОГРН 1026401574779
Телефон/факс (84551) 2-16-60

расч.40702810514240001256
в Филiaal Банка ВТБ (ПАО) г. Нижний Новгород
к/сч.30101810200000000837
БИК 042202837

АКТ

о внедрении законченной научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы «Совершенствование кормораздаточных транспортеров использованием линейных электромагнитных двигателей»

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер АО «Лысогорская птицефабрика» Дик Сергея Владимировича и представитель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», в лице руководителя работы, к.т.н., доцент Каргин В.А. составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Совершенствование кормораздаточных транспортеров использованием линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД)», выполненной на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ исполнителями доцентами Каргиным В.А. и Моисеевым А.П., и относящихся к разработке и созданию электромагнитных приводов на базе ЛЭМД с осевым каналом и интегрированным зажимным механизмом для кормораздаточных транспортеров, внедрены в АО «Лысогорская птицефабрика».

Разработанный привод позволит упростить кинематические схемы традиционных приводов с электродвигателями вращательного движения, улучшить условия труда, снизить потребление энергии. Ожидаемый интегральный эффект (ЧДД) от внедрения электромагнитного привода из расчета на 30 кормораздатчиков составит от 580 тыс. руб.

Главный инженер

АО «Лысогорская птицефабрика»

С.В. Дик

Исполнитель НИОКР, к.т.н.,
доцент ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

В.А. Каргин

Исполнитель НИОКР, к.т.н.,
доцент ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

А.П. Моисеев



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЛЫСОГОРСКАЯ ПТИЦЕФАБРИКА»

412860, Саратовская область
Лысогорский район, р.п. Лысые Горы
ИНН 6419980729
ОГРН 1026401374779
Телефон/факс (84551) 2-16-60

р.сч. 40702810514240001256
в Фидиал Банка ВТБ (ПАО) г. Нижний Новгород
к.сч. 30101810200000000837
БИК 042202837

АКТ производственных испытаний электромагнитного привода кормораздаточного транспортера

Комиссия в составе: председателя комиссии главного инженера АО «Лысогорская птицефабрика» Дика Сергея Владимировича и членов комиссии: главного энергетика АО «Лысогорская птицефабрика» Семенова Михаила Александровича, к.т.н., доцентов ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ Каргина Виталия Александровича, Моисеева Алексея Петровича составила настоящий акт на производственные испытания опытного образца привода кормораздаточного транспортера, выполненного на базе линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) с осевым каналом и интегрированным зажимным механизмом. Проверка работоспособности была проведена с 04 по 15 февраля 2019 года в АО «Лысогорская птицефабрика» Саратовской области, р.п. Лысые Горы.

Производственные испытания показали, что электромагнитный привод обладает необходимыми энергетическими характеристиками, прост в изготовлении и надежен в работе. При этом замена традиционного привода вращательного движения на электромагнитный позволит улучшить массогабаритные показатели и удешевить эксплуатацию кормораздаточного оборудования, применяемого в животноводстве и птицеводстве.

Председатель комиссии:

главный инженер

АО «Лысогорская птицефабрика»

С.В. Дик

Члены комиссии:

главный энергетик

АО «Лысогорская птицефабрика»

М.А. Семенов

к.т.н., доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

В.А. Каргин

к.т.н., доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

А.П. Моисеев





**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ЗНАК ХЛЕБА"**



ул. им. Н.Г. Чернышевского, д. 90, г. Саратов, 410017
Телефон: (8452) 20-34-85; 20-08-85; 20-35-50; факс: 29-64-65
E-mail: Office@znakhleba.ru
ОКПО 00348909, ОГРН 1026403341634
ИНН/КПП 6454001447/645401001

АКТ

**хозяйственных испытаний клипсатора для наложения скрепок на
упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий**

Комиссия в составе: председателя комиссии главного инженера Горюнова С.А. и членов комиссии: главного энергетика Каныгина С.Н., инженера-электрика Клейменова В.В., и доцента Каргина В.А., составила настоящий акт на хозяйственные испытания и производственную проверку разработанного на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», на основании результатов исследований к.т.н., доцента Каргина В.А. опытного образца электромагнитного клипсатора для наложения скрепок на упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий.

Испытания и производственная проверка проводилась в период с 11 ноября по 27 ноября 2019 года на участке упаковки хлебобулочных изделий.

Производственная проверка электромагнитного клипсатора показала его работоспособность и надежность выполнения технологического процесса наложения скрепок на упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий, высокими удельными показателями, компактностью, имеет необходимые

массогабаритные и энергетические показатели, обеспечивает ручную доставку всех элементов привода к месту работы.

Председатель комиссии:

главный инженер
ОАО «Знак Хлеба»



/Горюнов С.А./

Члены комиссии:

Главный энергетик
ОАО «Знак Хлеба»



/Каныгин С.Н./

Инженер-электрик
ОАО «Знак Хлеба»



/Клейменов В.В./

к.т.н., доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ



/Каргин В.А./





**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“ЗНАК ХЛЕБА”**



ул. им. Н.Г. Чернышевского, д. 90, г. Саратов, 410017
Телефон: (8452) 20-34-85; 20-08-85; 20-35-50; факс: 29-64-65
E-mail: Office@znakhleba.ru
ОКПО 00348909, ОГРН 1026403341634
ИНН/КПП 6454001447/645401001

АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской,
опытно-конструкторской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер ОАО «Знак Хлеба» (г. Саратов) Горюнов С.А. и представитель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», в лице руководителя работы к.т.н., доцента Каргина В.А. составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на тему «Совершенствование клипсатора для наложения скрепок на упаковку запечатываемых хлебобулочных изделий применением дискретного электромагнитного привода», выполненной на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии», исполнители Каргин В.А., Волгин А.В., Моисеев А.П. ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, внедрены в ОАО «Знак Хлеба» (г. Саратов).

Результаты внедрения исследований.

Разработанный электромагнитный клипсатор позволяет упростить кинематические схемы альтернативных приводов, улучшить условие труда, снизить потребление энергии; чистый дисконтированный доход от внедрения электромагнитного клипсатора ориентировочно составит 258 тыс. рублей за 5 лет эксплуатации на одно устройство.

Замечания и предложения о дальнейшей работе по внедрению:
рекомендовать к внедрению на предприятиях по производству хлебобулочных и колбасных изделий.

Главный инженер
ОАО «Знак Хлеба»

/ Горюнов С.А./

Руководитель НИОКР:
к.т.н, доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

/Каргин В.А./

Исполнители НИОКР:

к.т.н, доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

/Волгин А.В./

к.т.н, доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

/Моисеев А.П./





**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ЗНАК ХЛЕБА"**



ул. им. Н.Г. Чернышевского, д. 90, г. Саратов, 410017
Телефон: (8452) 20-34-85; 20-08-85; 20-35-50; факс: 29-64-65
E-mail: Office@znakhleba.ru
ОКПО 00348909, ОГРН 1026403341634
ИНН/КПП 6454001447/645401001

АКТ

хозяйственных испытаний электромагнитного сводообрушителя

Комиссия в составе: председателя комиссии главного инженера Горюнова С.А. и членов комиссии: главного энергетика Каныгина С.Н., инженера-электрика Клейменова В.В., доцентов Каргина В.А. и Волгина А.В., составила настоящий акт на хозяйственные испытания и производственную проверку разработанного на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», на основании результатов исследований к.т.н., доцентов Каргина В.А. и Волгина А.В. опытного образца электромагнитного сводообрушителя.

Испытания и производственная проверка проводилась в период с 13 ноября по 17 декабря 2019 года.

Производственная проверка электромагнитного сводообрушителя показала его работоспособность и надежность выполнения процесса обрушения и предотвращения образования устойчивых сводов муки в

металлических бункерах, высокими удельными показателями, компактностью, имеет необходимые массогабаритные и энергетические показатели.

Председатель комиссии:

главный инженер
ОАО «Знак Хлеба»

/Горюнов С.А./

Члены комиссии:

Главный энергетик
ОАО «Знак Хлеба»

/Каныгин С.Н./

Инженер-электрик
ОАО «Знак Хлеба»

/Клейменов В.В./

к.т.н., доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

/Каргин В.А./

к.т.н., доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ



/Волгин А.В./



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“ЗНАК ХЛЕБА”**



ул. им. Н.Г. Чернышевского, д. 90, г. Саратов, 410017
Телефон: (8452) 20-34-85; 20-08-85; 20-35-50; факс: 29-64-65
E-mail: Office@znakhleba.ru
ОКПО 00348909, ОГРН 1026403341634
ИНН/КПП 6454001447/645401001

АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской,
опытно-конструкторской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер ОАО «Знак Хлеба»(г. Саратов) Горюнов С.А. и представитель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», в лице руководителя работы к.т.н., доцента Каргина В.А. составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на тему «Совершенствование технических средств сводообрушения использованием линейного электромагнитного привода», выполненной на кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии», исполнители Каргин В.А., Волгин А.В. ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, внедрены в ОАО «Знак Хлеба» (г. Саратов).

Результаты внедрения исследования .

Разработанный электромагнитный сводообрушитель представляется вполне эффективным техническим средством для предотвращения и разрушения сводов сыпучего продукта, например, муки, в металлических бункерах; прост в управлении; имеет высокие, по сравнению с существующими устройствами схожего назначения, удельные энергетические показатели.

Главный инженер
ОАО «Знак Хлеба»

/Горюнов С.А./

Руководитель НИОКР:
к.т.н, доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

/Каргин В.А./

Исполнители НИОКР:

к.т.н, доцент ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ



/Волгин А.В./