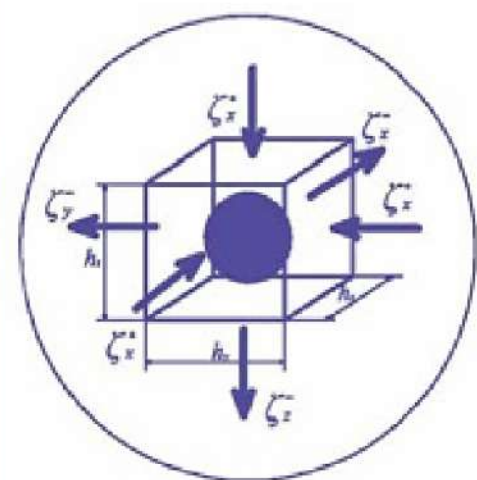
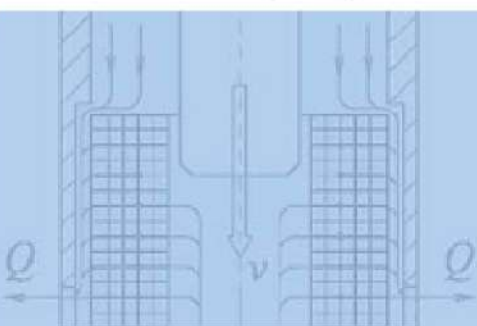


К.М. УСАНОВ, В.И. МОШКИН,  
В.А. КАРГИН, А.В. ВОЛГИН

# ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ПРИВОДЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ

Монография



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

К.М. УСАНОВ, В.И. МОШКИН, В.А. КАРГИН, А.В. ВОЛГИН

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ  
И ПРИВОДЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССАХ  
И ТЕХНОЛОГИЯХ**

Монография

Курган 2015

УДК 621.318.3

ББК 31.261.3

У 74

Рецензенты:

профессор кафедры «Системотехника» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», доктор технических наук Ю.М. Голембиовский;

зав. кафедрой «Энергообеспечение предприятий АПК» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», профессор, доктор технических наук В.А. Глухарев.

**Усанов К. М., Мошкин В. И., Каргин В. А., Волгин А. В.**

Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях : монография. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 202 с.

Книга посвящена вопросам разработки и создания линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) и приводов на их основе, применяемых в машинах для импульсных процессов и технологий. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований ЛЭМД с новыми рабочими процессами. Рассматриваются проблемы создания и совершенствования электромагнитных импульсных машин и систем с их использованием, способствующих энерго- и ресурсосбережению в технологиях АПК.

Предназначается для научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области новых систем электромагнитного привода и электрических машин.

ISBN 978-5-4217-0313-6

УДК 621.318.3

ББК 31.261.3

© Курганский государственный университет, 2015

© Усанов К.М., Мошкин В.И.,  
Каргин В.В., Волгин А.В., 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МАШИНАМИ В ТЕХНОЛОГИЯХ СЕЛЬХОЗПРОИЗВОДСТВА И НА ОБЪЕКТАХ АПК....	9
1.1 Импульсные электромагнитные системы в операциях и технологиях сельхозпроизводства и АПК .....	9
1.1.1 Возможности использования электромагнитных импульсных систем в стационарных установках и процессах (на примере операции сводообрушения).....	17
1.1.2 Оценка возможности применения передвижных электромагнитных систем на объектах АПК (на примере погружения стержневых элементов) .....	29
1.2 Обобщенная структурная схема импульсной электромагнитной системы для технологий АПК.....	41
1.3 Методы исследований силовых электромагнитных импульсных систем.....	48
2 УДАРНЫЕ МАШИНЫ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	51
2.1 Обоснование магнитной системы импульсного ЛЭМД .....	51
2.2 Оптимальные геометрические соотношения в магнитных системах однообмоточных броневых цилиндрических ЛЭМД.....	52
2.3 Расчет статических тяговых характеристик.....	54
2.4 Конструктивные схемы ЛЭМД.....	57
2.4.1 Конструктивные схемы осесимметричных цилиндрических ЛЭМД с комбинированным якорем и несколькими рабочими зазорами.....	57
2.4.2 Конструкция импульсного ЛЭМД со сквозным осевым каналом, комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами .....	63
2.5 Устройства согласования и передачи механической энергии в системе «двигатель – рабочий орган» .....	69
2.5.1 Устройство передачи и регулирования механической энергии в системе «импульсный ЛЭМД – бункер».....	69
2.5.2 Устройство передачи механической энергии в системе «импульсный ЛЭМД – стержень» .....	71
2.6 Редкоударная машина с импульсным ЛЭМД для сводообрушения в бункерах.....	76
2.7 Переносная электромагнитная ударная машина (УМ) для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт.....	78
3 ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УДАРНЫХ МАШИН С ЛЭМД.....	80
3.1 Краткий сравнительный анализ источников электропитания ударных машин с ЛЭМД.....	80
3.2 Основные типы электрических преобразователей для питания и управления ударных машин с ЛЭМД .....	88

3.2.1 Импульсные электрические преобразователи, подключаемые к источникам переменного тока .....	93
3.2.2 Импульсные электрические преобразователи, используемые с аккумуляторными источниками питания.....	102
3.2.3 Импульсные электрические преобразователи с емкостными накопителями энергии.....	110
4 ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛЭМД ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН.....	117
4.1 Методы расчета тепловых процессов в ЛЭМД импульсных машин .....	117
4.2 Расчет тепловых процессов ЛЭМД импульсных машин длительного режима работы.....	123
4.3 Определение стационарного температурного поля ЛЭМД.....	126
4.4 Влияние контактирующих поверхностей обмотки и статора на тепловой поток в ЛЭМД .....	130
4.5 Способы интенсификации охлаждения ЛЭМД импульсных машин.....	134
4.6 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с развитой теплоотдающей поверхностью.....	138
4.7 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с искусственным охлаждением.....	142
5 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН И СИСТЕМ С ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	152
5.1 Экспериментальные исследования электромагнитных машин. Стенды, измерительная аппаратура, методики исследований.....	152
5.2 Исследование энергопреобразования ЛЭМД, питаемого от сети.....	164
5.3 Электромагнитная ударная машина с конденсаторным питанием .....	169
5.4 Исследование энергопреобразования редкоударных машин с ЛЭМД, питаемых от емкостного накопителя .....	181
5.5 Влияние конструктивных параметров ЛЭМД на эффективность энергопреобразования и выходные показатели .....	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	189
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	199

## ВВЕДЕНИЕ

Сложившаяся ситуация и наметившийся подъем в производственных отраслях и сельском хозяйстве выдвигают перед инженерами-разработчиками актуальную задачу создания конкурентоспособной техники для реализации перспективных или совершенствования традиционных перерабатывающих, строительных и ремонтных технологий, без которых невозможно нормальное функционирования как отдельных сельскохозяйственных предприятий, так и всего агропромышленного комплекса (АПК) в целом. В настоящее время подъем, становление и устойчивое развитие сельскохозяйственной отрасли неразрывно связаны с поиском и внедрением прогрессивных методов интенсификации операций и процессов, среди которых импульсные и вибрационные способы, позволяющие концентрировать и эффективно расходовать энергию, занимают существенное место.

В потенциально реализуемых в АПК с применением импульсов или вибраций технологиях важное место принадлежит операциям и процессам, обеспечиваемым ударными импульсами значительной интенсивности передаваемыми в объект, продукт или среду. Анализ опубликованных данных показывает, что применение таких воздействий позволяет, например, предотвращать образование устойчивых сводов в бункерах хранения сыпучих продуктов, забивать (выдергивать) в грунт стержневые электроды при устройстве заземлений или катодной защиты при электрификации или газификации, вести инженерные изыскания при строительстве или реконструкции объектов АПК и т.п.

В настоящее время в технике такие воздействия обеспечиваются разнообразными по конструкции и параметрам пневматическими, гидравлическими, гидропневматическими, электрическими импульсными машинами, которые формируют ударные импульсы, передаваемые, обычно, через инструмент (волновод) в обрабатываемую среду. Поскольку во многих практических конструкциях происходит именно ударное взаимодействие подвижного элемента (бойка) с инструментом, то для обозначения технических устройств или приспособлений, наряду с названием «импульсные», в работе употребляется термин «ударные».

Системный подход, послуживший плодотворной методологической базой при исследовании и создании подобных машин и систем с их использованием, позволил к настоящему времени придать результатам вполне четкую трактовку в виде теории силовых импульсных систем, основные положения которой разработаны в трудах Н.П. Ряшенцева, Е.М. Тимошенко, А.И. Москвитина, П.М. Алабужева, О.Д. Алимова, А.В. Фролова, А.Н. Мирошниченко, В.В. Ивашина, Ю.З. Ковалева, Ф.Н. Сарапулова, Г.Г. Угарова, О.Н. Веселовского, Б.Ф. Симоно-

ва, В.Н. Гурницкого, Г.В. Никитенко, А.В. Львицына, А.Т. Малова, В.Ю. Неймана и других специалистов.

Известная подвижность познавательных принципов системного подхода, в соответствии с которыми любую сложную систему можно расчленить (всегда не единственным образом) на конечное число подсистем, а каждую подсистему (высшего уровня) можно, в свою очередь, расчленить на конечное число более мелких подсистем, позволяет называть силовой импульсной системой как собственно машину (с пневмо-, гидро- или другим приводом), так и машину с некоторой совокупностью объектов, обеспечивающих её работоспособность и представляющих функциональное единство. В последнем случае машина (ударный механизм) является лишь частью, выходным элементом (исполнительным органом) силовой импульсной системы, содержащей помимо самой машины еще системы приготовления, поддержания или регулирования нужных параметров рабочего тела (энергоносителя) и его транспортировки к машине (в пневмо- и гидросистемах) или источник электропитания, преобразователь и управляющее устройство (в электрических системах). Именно эти элементы системы во многом определяют удельные выходные показатели и степень совершенства импульсной машины, без этих элементов функционирование машин невозможно.

В настоящее время бóльшая часть практических задач в АПК традиционно решается с помощью пневмо- и гидроимпульсных систем или электроприводов вращательного действия. Сравнение показателей гидроударных машин показывает, что это, как правило, крупногабаритные устройства, имеющие навесное исполнение или доставляемые к месту работы транспортными средствами. Для их установки в рабочее положение и перемещения на объекте необходимы подъёмно-транспортные механизмы, а для энергообеспечения – стационарные сети или мощные передвижные установки.

Однако значительная доля перечисленных операций и процессов, в частности, при строительстве, реконструкции или ремонте объектов АПК, выполняется зачастую в стеснённых условиях строительной площадки, на откосах, траншеях, вблизи или внутри строящихся или реконструируемых зданий и сооружений, когда мощные навесные импульсные машины малоэффективны или вовсе не применимы, а известные переносные или ручные инструменты и приспособления (молотки, перфораторы, бетоноломы) не могут обеспечить нужного результата. Кроме того, некоторые виды работ ведутся на необорудованных местах, при отсутствии энергокоммуникаций либо при значительном их удалении, когда питание от автономных источников ограниченной мощности предпочтительно или безальтернативно.

Свойственные традиционным импульсным системам усложненность конструкции и сопровождаемая потерями на промежуточных стадиях многоступен-

чатость преобразования первичной энергии в механическую послужили в свое время важным стимулом к созданию силовых импульсных систем с электроприводом. Здесь из сложившихся традиционно направлений перспективным при разработке импульсных машин и систем с их использованием является линейный электрический привод. При этом применение импульсных линейных электрических двигателей представляется особенно предпочтительным, поскольку позволяет обеспечить непосредственное преобразование электрической энергии в механическую работу подвижной части с линейной траекторией движения [13; 24; 42; 44; 53; 54; 100]. Объединение в одном блоке машины-двигателя и машины-орудия даёт такие известные преимущества, как упрощение и удешевление всего устройства, повышение его энергетических характеристик, надёжности, снижение затрат на обслуживание [104].

ЛЭМД относятся к импульсным электромеханическим преобразователям и представляют самостоятельный класс специальных электрических машин, обладающих специфическими свойствами [24; 46; 62; 104]. В них сочетаются конструктивная простота и надёжность [24], они наиболее приспособлены к тем приводным устройствам, в которых рабочий орган совершает возвратно-поступательные движения. Применение ЛЭМД в этих изделиях следует считать идеальным, так как вид движения двигателя и рабочего органа машины совпадают [24; 104].

Накопленный к настоящему времени значительный положительный опыт создания и практического применения импульсных машин и устройств различного назначения с линейными электрическими, в том числе с электромагнитными двигателями, свидетельствует об интенсивном развитии так называемых силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС). Предпочтительность их применения при совершенствовании перечисленных и схожих технологий определяется лучшей экологичностью, возможностью упрощения кинематических схем и конструкций машин, уменьшения многоступенчатости энергопреобразования, улучшения массогабаритных характеристик изделий и выступает важным направлением энерго- и ресурсосбережения в АПК. Прогнозные оценки показывают, что использование СЭМИС вместо традиционных электроприводов в перечисленных или схожих операциях позволяет сократить энергозатраты на реализацию отдельной операции от двух и более раз и сэкономить за год, в среднем, не менее 1000 кВт·ч электроэнергии на каждую систему.

Главным препятствием в рациональной замене традиционных электроприводов и систем импульсными электромагнитными являются отсутствие либо неприспособленность известных машин с ЛЭМД к операциям и процессам сельхозпроизводства, а необходимым условием расширения областей их эффективного применения в технологиях АПК, основанных на использовании ударных воз-

действий, является повышение эффективности как электромагнитных двигателей импульсных машин, так и совершенствование систем с их использованием стационарного и мобильного исполнения, в том числе переносных с автономными источниками.

Поскольку линейный электромагнитный двигатель обоснованно выдвигается главной «единицей» при анализе таких систем, значительная часть исследований направлена на совершенствование и повышение эффективности именно ЛЭМД. При этом изучению других важных компонентов системы, определяющих ее практическую пригодность и оказывающих непосредственное влияние на показатели импульсных машин с ЛЭМД – источникам тока, накопителям энергии, электрическим управляющим преобразователям, – при исследовании СЭМИС уделяется меньше внимания.

Недостаточность проработки общесистемных вопросов сдерживает развитие, ограничивает функциональные возможности и особенно отчетливо проявляется при создании мобильных импульсных электромагнитных систем, повышающих эффективность инженерных изысканий при сооружении и реконструкции объектов АПК, технологий выполнения заземляющих устройств в сельских электроустановках или катодной защиты при газификации села, изготовления изгородей при обустройстве пастбищ, малодебитных водяных скважин в фермерских и дачных хозяйствах, других схожих технологий, поскольку здесь становятся важными свойства не только составных частей СЭМИС, но и закономерности функционирования сложного объекта в целом. Появляется совокупность новых задач по определению рациональной структуры системы, организации взаимодействия элементов и подсистем, учету влияния внешней среды, выбору энергетически выгодных режимов действия, оптимальному управлению системой и др.

Преодолеть подобную ограниченность, определить недостаточность прежних условий для постановки и решения новых практических задач, обозначить отличные от существующих структурные и типологические характеристики элементов СЭМИС позволяет системный подход. Комплексному, с учетом принципов этого подхода, решению проблемы совершенствования и создания, в том числе мобильных систем с импульсными электромагнитными машинами, повышающими эффективность и экологичность целого ряда операций и процессов в технологиях АПК, посвящена настоящая монография.

# **1 ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МАШИНАМИ В ТЕХНОЛОГИЯХ СЕЛЬХОЗПРОИЗВОДСТВА И НА ОБЪЕКТАХ АПК**

## **1.1 Импульсные электромагнитные системы в операциях и технологиях сельхозпроизводства и АПК**

В настоящее время импульсные и вибрационные методы интенсификации технологических процессов получили широкое распространение в технике и применяются, в том числе на предприятиях и объектах АПК. Технологии сельскохозяйственной отрасли отличаются значительным разнообразием и во многих случаях сложнее промышленных. Однако считается доказанным, что применение механических импульсов и колебаний снижает энергозатраты и повышает эффективность обработки почвы, внесения удобрений, уборочных и послеуборочных процессов, операций в животноводстве, проведения ремонта сельскохозяйственной техники. Результативность такого применения существенно зависит от обоснованности и рациональности выбора и использования средств возбуждения колебаний и импульсов.

Оценить уровень и определить тенденции развития и применения силовых систем с импульсными машинами в технике, в технологиях и процессах АПК позволяет их систематизация. В основу обобщенной классификации, предложенной в [1; 2; 3], положено шесть основных признаков:

- принцип действия инструмента и технологическое назначение машины;
- способ применения, передвижения и масса машины;
- вид подводимой энергии и тип двигателя;
- взаимосвязь двигателя с импульсным механизмом;
- принцип действия импульсного механизма;
- способ передачи механической энергии двигателя инструменту.

Сопоставление данных различных источников [1-5], сравнение характерных свойств множества конструктивных схем пневматических, гидравлических и электрических импульсных машин позволяет представить классификацию в виде рисунка 1.1.

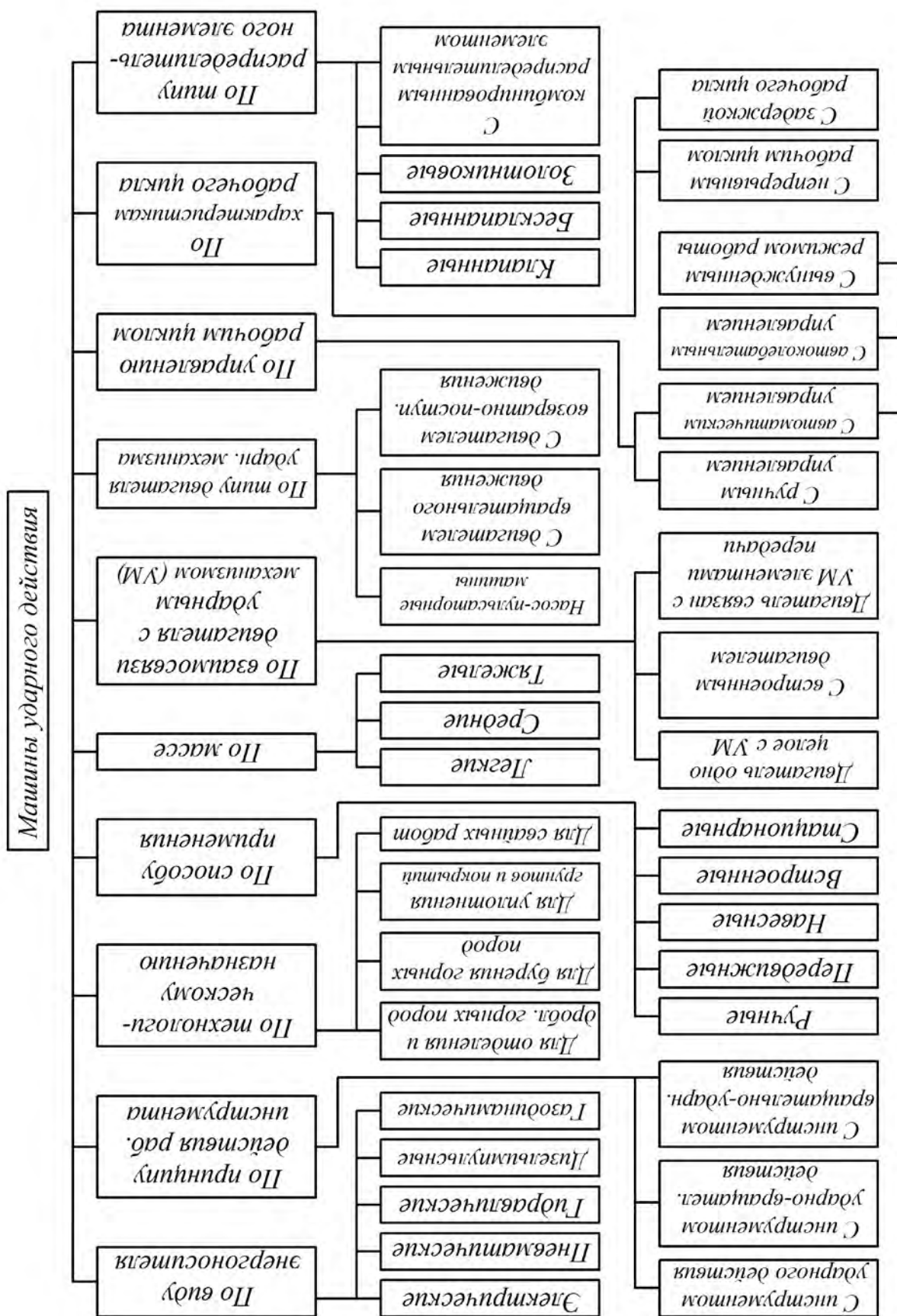


Рисунок 1.1 – Классификация машин ударного действия

Технические данные традиционных гидро- и пневмоимпульсных машин, получивших наибольшее применение в технике, приведены в работах [1-3; 5; 6]. Так, перечень гидроударников [6] содержит более ста наименований машин, в основном зарубежного производства с энергией единичного удара  $A_y = 80 \dots 28 \cdot 10^3$  Дж, ударной мощностью  $N_{y0} = 1,89 \dots 60$  кВт и массой  $m = 15 \dots 20,8 \cdot 10^3$  кг. Список пневмоударных устройств короче и включает не более трех десятков машин различного функционального назначения – навесных пневмомолотов, машин для забивания стержней в грунт, пневмопробойников, погружных пневмоударников и пневмоударных расширителей скважин [2; 7].

Широкие масштабы, номенклатура и области применения этих изделий в различных отраслях производства обусловлены их неоспоримыми достоинствами, такими как относительно высокая мощность при малых габаритных размерах и массе, возможность эксплуатации в самых неблагоприятных условиях, безопасность, мобильность, надежность, большой технический ресурс.

К особенностям, сдерживающим или ограничивающим их использование, следует отнести:

- громоздкую и дорогую систему приготовления рабочего тела (энергонасителя) с высокими показателями, содержащую маслостанцию, стационарное компрессорное оборудование (передвижной компрессор), пневмосеть и др.;
- низкий общий КПД системы (0,12...0,15);
- требования к качеству масел;
- высокий уровень шума при выхлопе сжатого воздуха;
- значительное усилие поджатия, необходимое для нормальной работы некоторых типов ручных машин.

Низкий общий КПД предопределяется многоступенчатостью энергопреобразования в этих системах, когда насос высокого давления (компрессор), приводимый первичным двигателем, создает рабочее тело с необходимыми параметрами (давление, расход) и обеспечивает действие гидро- (пневмо-) ударника, преобразующего потенциальную энергию жидкости или газа в кинетическую энергию ударной массы. Дискретная выходная величина в виде последовательности импульсов механической мощности  $P_y = A_y \cdot n_y$  обеспечивается непрерывной приводной мощностью  $P_{np}$ , при этом в подавляющем большинстве случаев  $P_{np} > P_y$ , что объясняется отсутствием эффективных гидро- или пневмоаккумуляторов.

Высокие давление и эксергия рабочего тела в пневмо- и в гидроударниках (до 15 МПа) предопределяют, наряду с хорошими удельными показателями, конструктивную и технологическую сложность как самих машин, так и систем в целом, повышенные требования к условиям изготовления, ремонта и обслужи-

вания. При этом, как отмечено в [6], в обычных производственных условиях все эти требования выполнить подчас затруднительно.

Таким образом, проблему разработки, создания и использования компактных мобильных автономных силовых систем с относительно мощными (выходная энергия до 1 кДж) машинами импульсного действия, не требующих для транспортировки и применения крупногабаритных транспортных средств, а доставляемых на объект, в том числе переноской вручную, к настоящему моменту нельзя признать решенной окончательно.

Такие системы, оснащенные малогабаритными источниками питания ограниченной мощности, способны конкурировать с традиционными не только в технологиях и на объектах АПК, но и в других применениях, в частности, при ликвидации последствий катастроф и техногенных аварий, при выполнении спасательных работ для разборки завалов, разрушения фундаментов, плит, кирпичных кладок, в военной области, импульсной сейсморазведке малых глубин. Упоминание о совершенствовании технических средств для сейсморазведки в настоящей работе представляется уместным, поскольку наибольший объем изысканий, проводимых геофизическими экспедициями при изучении геологических разрезов, осуществляется в сельской местности, на полях и сельхозугодиях, где при отработке многокилометровых профилей тяжелая колесная техника наносит ущерб значительной части посевных площадей. Создание и использование для исследования глубин до 500 м компактных импульсных, например электромагнитных, источников взамен традиционных мощных газодинамических сейсмогенераторов способствует снижению ущерба, обеспечивает энергосбережение и повышает экологичность технологии работ за счет сокращения на профиле числа мощных передвижных агрегатов.

При оценке возможности или предпочтительности применения систем с импульсными электромагнитными машинами в тех или иных технологиях или на объектах АПК их следует условно разделить (рисунок 1.1) на стационарные и мобильные; навесного исполнения, переносные и ручные; импульсные ударного действия и безударные, силовые; редкоударные (менее 0,1 Гц) или с относительно большой (до 10 Гц) необходимой частотой повторений рабочих циклов; по значению перемещений рабочего органа машины – короткоходовые (до 100 мм) и длинноходовые (>500 мм).

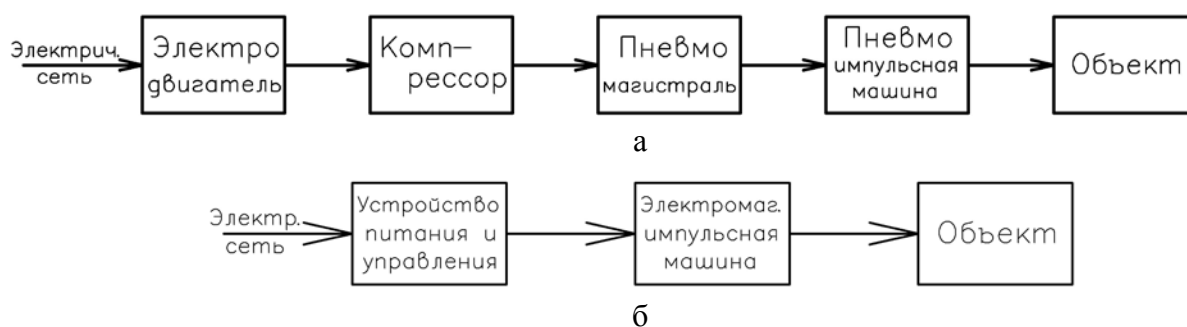
Применяемые в подавляющем большинстве практических случаев передвижные гидро- и пневмоимпульсные системы и изделия навесного, переносного исполнения или ручные обладают высокими энергетическими и массогабаритными характеристиками, просто монтируются на транспортное средство и демонтируются с него, легко обеспечиваются энергоносителем от гидро- или пневмосистемы трактора, самоходного шасси или автомобиля. Эти же особенно-

сти свойственны и стационарным импульсным устройствам, используемым, например, на сравнительно крупных предприятиях по хранению, переработке зерна, муки, хлебозаводах, где, как правило, существует компрессорное хозяйство, смонтированы пневмомагистрали и традиционно используются зарекомендовавшие себя для импульсных воздействий на материал или среду пневмоударные механизмы, пневмопушки и т.п. В таких условиях применения электромагнитным преобразователям и системам трудно конкурировать с традиционными.

Однако на небольших сельскохозяйственных или перерабатывающих предприятиях, использующих один вид энергоносителя, в мобильных применениях при незначительных объемах предполагаемых монтажных работ, например, при реконструкции заземляющих устройств сельских трансформаторных подстанций, когда транспортировать мощную технику нецелесообразно и следует обходиться легковым автотранспортом, при устройстве водяных скважин в стесненных условиях обжитых садово-дачных участков и других схожих условиях системы с импульсными электромагнитными машинами, представляются уместными и могут конкурировать с традиционными, поскольку способны обеспечить:

- энергию импульсного воздействия  $A_y=100\dots1000$  Дж;
- оперативное регулирование выходных параметров в широких пределах;
- автономную работу от источника ограниченной мощности на необорудованных коммуникациями площадках и нормальную работоспособность;
- высокие удельные показатели, компактность, возможность ручной доставки всех элементов системы (самой машины, источника питания и т.д.) к месту работы;
- экологичность, простоту эксплуатации и надежность в работе, максимальную безопасность персонала;
- высокую работоспособность в различных природноклиматических условиях;
- минимальное время подготовки и запуска в работу.

Совокупность технических устройств и последовательность энергопреобразований в традиционных и предлагаемых системах с импульсными электромагнитными машинами для процессов и технологий сельхозпредприятий иллюстрируются структурными схемами на рисунках 1.2, 1.3. Сравнение показывает, что применение электромагнитных систем позволяет обойтись без компрессоров, маслостанций, магистралей для транспортировки рабочей среды к импульсной машине, что существенно упрощает изготовление, монтаж, удешевляет эксплуатацию систем и обеспечивает, таким образом, совершенствование перечисленных или схожих технологий, реализуемых на предприятиях АПК.

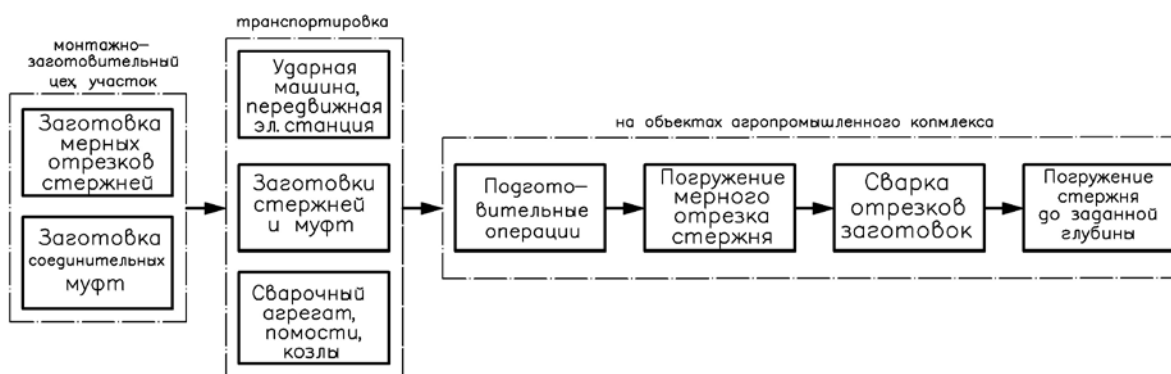


*а – пневматические системы; б – электромагнитные системы*  
 Рисунок 1.2 – Энергопреобразования в силовых импульсных системах

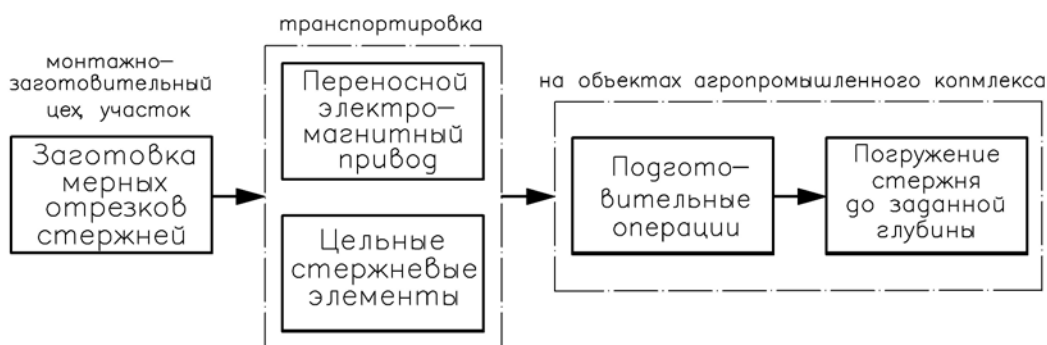
Соответственно приведенному условному делению и особенностям систем с импульсными электромагнитными машинами обозначим их характерные применения в сельхозпредприятиях и на объектах АПК, чтобы обосновать требования к этим системам.

Для стационарного оборудования являются характерными и представляют интерес как импульсные ударные системы с коротким (менее 100 мм) ходом ударника (например, побудители истечения для бункерных устройств, дозаторов и т.п.), так и безударные силовые импульсные устройства, где необходимые перемещения рабочего элемента достигают 500 или более миллиметров (малогабаритные прессы для отжимания сока или прессования кип, приводные устройства штанговых или тросошайбовых транспортеров).

При этом отличительным свойством и преимуществом ЛЭМД перед электродвигателями других типов является не критичность к системе электропитания и качеству электроэнергии. В отличие от широко применяемых в приводах машин и оборудования асинхронных электродвигателей, которым для рабочего процесса необходима трёхфазная система со строго выдержанными частотой, номинальным напряжением, соотношением мощностей питающего трансформатора и нагрузки, в линейных электромагнитных двигателях дискретный энергопреобразовательный цикл позволяет использовать в качестве источника не только трёх-, но и однофазные осветительные сети с любым отклонением напряжения и частоты, передвижные и переносные бензогенераторы, аккумуляторные батареи и нетрадиционные источники. При необходимости параметры питающих импульсов напряжения и тока здесь легко обеспечиваются с помощью промежуточных накопителей, например конденсаторов. Даже при деэлектрификации «неперспективных» поселков и хуторов это обеспечивает уверенные предпосылки к сохранению электромеханизации наиболее трудоемких процессов, например, кормораздачи и навозоудаления, в животноводческих помещениях.



а



б

Рисунок 1.3 – Технология погружения в грунт стержневых элементов торцевым (а) и неторцевым (б) способами

При этом отличительным свойством и преимуществом ЛЭМД перед электродвигателями других типов является нечувствительность к системе электропитания и качеству электроэнергии. В отличие от широко применяемых в приводах машин и оборудования асинхронных электродвигателей, которым для рабочего процесса необходима трёхфазная система со строго выдержанными частотой, номинальным напряжением, соотношением мощностей питающего трансформатора и нагрузки, в линейных электромагнитных двигателях дискретный энергопреобразовательный цикл позволяет использовать в качестве источника не только трёх-, но и однофазные осветительные сети с любым отклонением напряжения и частоты, передвижные и переносные бензогенераторы, аккумуляторные батареи и нетрадиционные источники. При необходимости параметры питающих импульсов напряжения и тока здесь легко обеспечиваются с помощью промежуточных накопителей, например конденсаторов. Даже при деэлектрификации «неперспективных» поселков и хуторов это обеспечивает уверенные предпосылки к сохранению электромеханизации наиболее трудоемких процессов, например, кормораздачи и навозоудаления, в животноводческих помещениях.

В мобильном, в том числе переносном, исполнении представляются важными электромагнитные импульсные машины для забивания конусных зондов

при проведении инженерных изысканий [8] или для погружения-извлечения стержней, труб, мелких свай и т.п., которые используются при монтаже заземляющих устройств сельских потребительских подстанций 10/0,4 кВ или катодной защиты, при установке изгородей для обустройства культурных пастбищ, при изготовлении неглубоких трубчатых колодцев для водоснабжения фермерских, дачных хозяйств и др. При этом необходимы машины, обеспечивающие не только торцевую забивку относительно коротких труб или свай, но и модификации для работы с длинными, продольно-неустойчивыми стержневыми элементами, не допускающими приложение торцевой нагрузки при монтаже.

Нацеленная в том числе на совершенствование пребывающей в настоящее время в крайне неудовлетворительном состоянии инфраструктуры села Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия предполагает возведение значительного числа сельскохозяйственных объектов различного назначения – ферм, птичников, складов сельхозпродукции, холодильников и т.д. При этом традиционные методы капитального строительства сельхозобъектов не позволяют решить поставленные проблемы в ограниченные сроки. Предлагаемые в настоящее время на рынке строительных услуг высокоскоростные технологии строительства сельхозобъектов на базе каркасных металлоконструкций дают возможность быстро, качественно, с минимальным привлечением рабочей силы и строительной техники возводить здания и сооружения сельскохозяйственного назначения по сборной технологии [9]. Легкокаркасные металлические профили, являющиеся своеобразным унифицированным «конструктором» [10], позволяют обойтись на строительной площадке без сварки, отказаться от дорогостоящих земляных работ при замене капитальных фундаментов облегченными, ленточными, традиционного грузоподъемного и другого габаритного строительного оборудования. Очевидно, что при намеченных объемах возведения сельхозобъектов с использованием современных строительных технологий предполагаемая замена традиционных импульсных машин и систем электромагнитными позволит удешевить работы, сэкономить значительные материальные ресурсы и может служить существенным аргументом необходимости исследований по совершенствованию и созданию систем с электромагнитными машинами с новыми свойствами для АПК.

Сведения о наиболее характерных операциях и процессах, реализуемых в сельхозпроизводстве машинами и системами с электроприводами импульсного и колебательного действия представлены в работах [11-13].

Поскольку перечень операций и процессов, в которых следует применять системы с импульсными электромагнитными машинами с целью упрощения, удешевления и совершенствования технологий значителен, а требования к

функциональным схемам машин, компоновке систем, режимам их действия существенно разнятся, представляется необходимым сопоставить существующие способы технической реализации характерных процессов в стационарных и передвижных установках, оценить возможности известных и наметить пути исследования и разработки силовых импульсных электромагнитных систем (СЭМИС) с новыми свойствами.

### **1.1.1 Возможности использования электромагнитных импульсных систем в стационарных установках и процессах (на примере операции сводообрушения)**

Характерные процессы сельскохозяйственного производства связаны с хранением и транспортировкой сыпучих материалов, доля которых составляет около 60% всех перерабатываемых грузов. Часто при этом используются бункерные устройства, которым наряду с очевидными достоинствами (возможность сочетания с любыми механизмами непрерывного или периодического действия, возможность аккумулирования сыпучего материала в том или ином объеме, простота конструкции и обслуживания, большая пропускная способность, надежность) свойственен серьезный недостаток – перебои при выгрузке сыпучих материалов, приводящий к резкому снижению производительности сельскохозяйственных машин и оборудования, дополнительным затратам рабочего времени и энергии на восстановление сыпучести. Причиной перебоев являются образующиеся у выпускного отверстия устойчивые своды, приводящие к зависанию и частичному или полному прекращению истечения материала из бункера [14-18]. Затраты на осуществление мероприятий по устранению простоев, вызванных сводообразованием сыпучих материалов, составляют около 20...30% от общих затрат на обслуживание бункерных устройств [14-17].

Существует ряд мер, предотвращающих нарушение нормального истечения сыпучего материала из бункеров: обеспечение стандартной влажности сыпучего груза, обогрев бункеров, введение в среду различных добавок, понижающих слеживаемость, покрытие стенок емкостей специальными материалами и пленками.

Проблема бесперебойной выгрузки сыпучих материалов в нашей стране и за рубежом решается в двух направлениях: оптимизация конструкций емкостей и выгрузных отверстий и применение различных сводообрушающих устройств.

Вопрос оптимизации конструкций бункеров и выпускных отверстий достаточно полно изучен в работах В.А. Богомягих, Л.В. Гячева, Р.Л. Зенкова и других ученых. Они вели исследования, направленные на улучшение эксплуатационных качеств бункеров путем выбора их оптимальных геометрических параметров.

Патентный поиск, анализ отечественной и зарубежной литературы показывают многообразие конструкций бункеров, предназначенных для хранения и выпуска различных материалов. Известны конструкции бункеров, в которых давление на стенки снижается за счет конструктивных особенностей. Так, бункеры фирмы «Blendomat», используемые в ФРГ, США, Швейцарии, Италии, имеют в своей конструкции направляющий (разгрузочный) выступ. Одна из стенок бункера расположена под углом  $40^0$  к выпускному отверстию, а оставшиеся три стенки расположены вертикально [19].

Сводообразование в емкостях для сухих концентрированных кормов можно предупредить устройствами, выполненными в виде горизонтальных полок, конусообразных и крышеобразных рассекателей, направляющих труб [19]. Известны конструкции разгрузочных устройств, в которых снятие нагрузок внутри массы сыпучего материала осуществляется за счет установки системы встроенных клиновидных элементов, обеспечивающих перенос существующей массы столба на стенки бункера. Примером служат системы снятия нагрузок (ССН) фирмы «Бюлер» (Швейцария), «Швебише Хюттенерке» (Германия), выполненные в виде расположенных внутри бункера разгрузочных элементов – ступеней, строго рассчитанных в соответствии с видом сыпучего материала. На ряде хлебозаводов внедрена ССН, позволяющая улучшать качество разгрузки за счет организации распределения сил трения по площади внутренней поверхности бункера. Это осуществляется применением поверхностей с различной степенью шероховатости [20]. Недостатками таких конструкций являются усложнение бункеров, повышение их металлоемкости. Наряду с оптимизацией конструкций бункеров применяют различные побудительные устройства для предотвращения и разрушения сводов.

Определяющими представляются следующие требования, которым должны удовлетворять такие устройства: малые металло- и энергоемкость; высокая надежность и долговечность; простота и технологичность конструкции; безопасность в эксплуатации; работоспособность в агрессивных средах и при высоких температурах; минимальное отрицательное воздействие на сыпучий материал и на прочность бункерного устройства.

В работе [21] предложена классификация существующих конструкций побудительных устройств для разрушения сводов сухих и влажных концентрированных сыпучих материалов в бункерах (рисунок 1.4), которая упрощает задачу выбора наиболее предпочтительного исполнения и привода сводообрушителя. Применяемые в практике устройства для обрушения сводов целесообразно классифицировать по виду используемой энергии, по способу разрушения свода, по принципу действия, по конструкции сводообрушающего органа, по характеру воздействия на бункер или среду.

По виду используемой энергии сводообрушители подразделяются на пневматические, гидравлические, электрические.

Пневматические побудители могут быть выполнены на основе естественной подачи воздуха в полость бункерного устройства. Поступающий воздух способствует улучшению истечения сыпучего материала. Однако эта система не является вполне эффективной для сыпучих материалов, имеющих высокую влажность [18].

Пневмопобудители с искусственной равномерной подачей воздуха аэрируют уплотнившийся материал в зоне выгрузного устройства. Струи воздуха разрыхляют сыпучий материал, увеличивая расстояние между частицами, что создает условия для свободного гравитационного истечения груза [17].

В ФРГ, например, широко распространены пневматические выпускные отверстия моделей MFPC и MFPE (рисунок 1.5а).

В нашей стране широко применяются аэроднища различной конструкции, устанавливаемые внутри бункеров в зоне выпускного отверстия. Известно бункерное устройство, выпускное отверстие которого снабжено воздушными каналами, аэрирующими сыпучий материал в зоне выгрузки, что позволяет полностью использовать объем бункера без перехода на коническую выгрузную часть [18].

Предложены пневматические сводообрушители, выполненные в виде пневмоподушек. Надувная неопреновая подушка располагается в зоне сводообразования. При необходимости в полость подушки подается воздух, что приводит к увеличению ее объема и разрушению свода. Аналогичные устройства имеют применение в зарубежной практике (шведская фирма KMW). Основным недостатком пневматических подушек является повышенный износ в процессе работы [18].

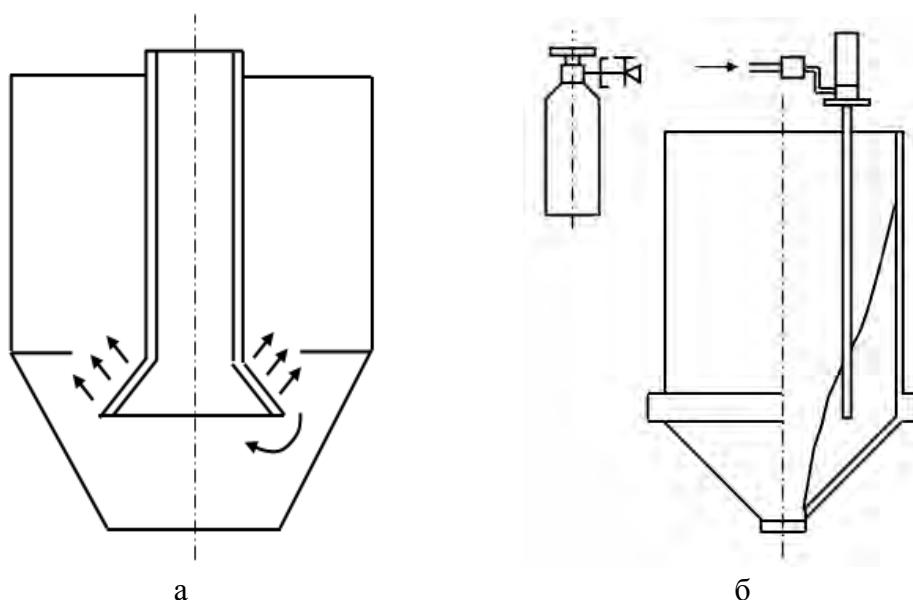
Пневмопобудители с искусственной импульсной подачей воздуха могут быть выполнены в виде пневматических сопел, через которые под давлением подается сжатый воздух (рисунок 1.5б). Мгновенная подача воздуха при открытии действующих вентилей способствует улучшению процесса истечения сыпучего материала. Примером может служить пневмоимпульсное устройство «ИСТА-3». Известны конструкции пневматических вибрационных сводообрушителей, которые по принципу действия подразделяются на шаровые, роторные и поршневые [22; 23].



Такие устройства могут передавать вибрации на стенку бункера, виброднище или на сводообрушающий орган, помещенный внутрь емкости в толщу материала. Они просты в устройстве и эксплуатации, имеют высокую надежность, позволяют регулировать частоту вибрации путем изменения давления сжатого воздуха.

Из гидравлических сводообрушителей нашли применение вибраторы циркуляционного действия. Их отличает высокая мощность, долговечность, плавная регулировка параметров вибрации, возможность работы в агрессивных средах и при высоких температурах.

Основным недостатком гидравлических вибраторов является использование в качестве рабочего тела жидкости под давлением, что приводит к необходимости использования насосов и специальных установок, а также к многоступенчатому преобразованию первичной энергии.



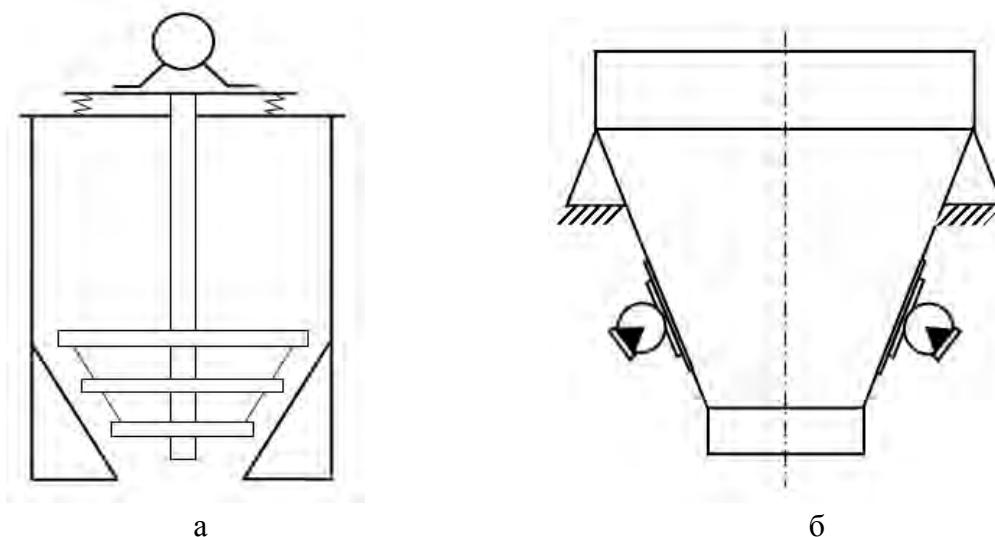
*Рисунок 1.5 – Пневмопобудитель с искусственной равномерной (а) и импульсной (б) подачей воздуха*

Из показанных на рисунке 1.4 перспективными представляются машины с прямым преобразованием электроэнергии [24].

Применяемые в настоящее время конструкции сводообрушителей с электроприводом по способу разрушению свода можно подразделить на вибрационные, возвратно-поступательные, вращательные, ударные, виброударные.

Из вибрационных побудителей истечения с электроприводом наиболее широко применяются электромеханические побудители (дебалансные мотор-вибраторы), которые могут передавать вибрации либо на элементы бункера, либо на рабочий орган, опущенный внутрь емкости в толщу материала. Примером могут служить вибраторы ИВ-104Н [25]. Однако они имеют невысокий гарантированный ресурс работы, не могут надежно работать в агрессивных средах и при

высоких температурах, оказывают отрицательное воздействие на прочность бункерного устройства. По конструктивному исполнению рабочего органа вибрационные электромеханические сводообрушители можно разделить на колокольные, мембранные, штанговые, с подвижными плоскостями, лопастные [18]. Они обеспечивают механическое воздействие на уплотнившуюся массу груза, разрыхление и вывод его из емкости. К недостаткам таких устройств следует отнести сложность конструкции, высокую металлоемкость, трудоемкость обслуживания. Схемы некоторых вибрационных активаторов показаны на рисунке 1.6.



*Рисунок 1.6 – Вибрационные сводообрушители воздействующие непосредственно на сыпучий материал (а) и на поверхность бункера (б)*

Сводообрушители вращательного и возвратно-поступательного действия с электроприводом от трехфазного асинхронного двигателя воздействуют на сыпучий материал с помощью сводообрушающих органов, которые по конструктивному исполнению аналогичны вибрационным и подразделяются на штанговые, скребковые, лопастные, спиральные, шнековые, цепные. Эти устройства являются эффективными средствами борьбы со сводообразованием в емкостях, так как разрыхляют материал и препятствуют его слеживанию. Однако, учитывая значительную энергоемкость таких сводообрушителей и затраты на их изготовление, целесообразно их использовать в том случае, когда другие типы сводообрушителей не обеспечивают бесперебойное истечение материала из емкостей.

Удобными на практике представляются накладные вибрационные устройства, которые устанавливаются с наружной стороны стенки бункера. В частности, электромагнитные вибрационные побудители типа ЭРВС [26] имеют большой ресурс работы, универсальность и допускают регулирование параметров. Однако эти устройства не всегда эффективны, так как возникает сложность согласования

параметров электромагнитного виброударного устройства с собственной частотой колебаний бункера, при которой в нем возникают резонансные явления.

Для предотвращения образования или разрушения устойчивых сводов сухих и влажных концентрированных сыпучих материалов в металлических бункерах представляется перспективным использование ударного импульсного воздействия на внешнюю поверхность бункерного устройства. По сравнению с вибрацией регулярное превентивное импульсное воздействие требует меньших энергозатрат и не имеет недостатков, присущих вибрационному сводообрушению. Зону установки импульсных сводообрушителей на внешней поверхности бункера и величину силового импульсного воздействия, обеспечивающих бесперебойный выход продукта, можно определить следующим образом.

В работах [14-18] показано, что при истечении сыпучих материалов из бункеров образуются как неустойчивые, так и статически устойчивые своды. Неустойчивые своды появляются при любом виде истечения и в любом сечении бункера и в процессе движения вышележащих слоев сыпучего тела регулярно разрушаются. Контакты частиц, образующих неустойчивый свод, не лежат на кривой давления от вышележащей нагрузки. Статически устойчивые своды препятствуют истечению сыпучего тела из выпускного отверстия бункера. Контакты составляющих их частиц лежат на кривой давления от вышележащей нагрузки.

Процесс образования неустойчивых и устойчивых сводов представляется следующим образом. При движении частиц в сужающемся потоке (рисунок 1.7) по линиям скольжения (показаны пунктиром), параллельным образующей поверхности скольжения потока к выпускному сечению бункера, возрастают нормальные составляющие сил, действующие в плоскости контакта частиц, и сила трения между ними. Это способствует появлению тормозящих импульсов, препятствующих движению частиц и обуславливающих возникновение из этих частиц неустойчивых и статически устойчивых сводов. По мере уменьшения поперечных сечений потока своды появляются все чаще и становятся устойчивее. При возникновении статически устойчивого свода истечение сыпучего тела из бункера прекращается.

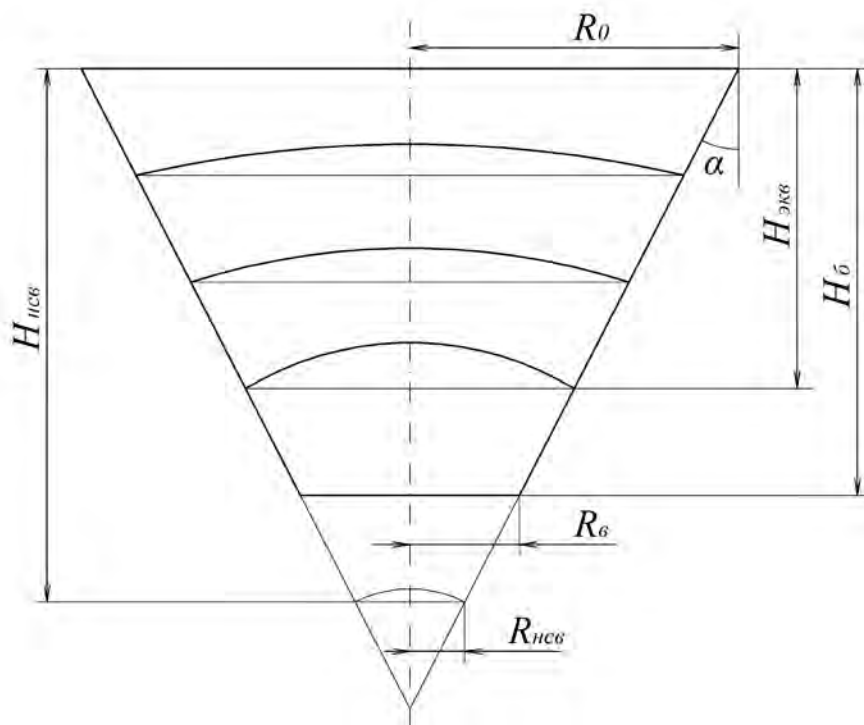


Рисунок 1.7 – Схема формирования сводов при истечении сыпучего материала

Усилие вышележащей нагрузки, передаваемое опорой свода поверхности скольжения, определяется силой  $T$ , являющейся касательной к кривой свода в точке опоры и составляющей с горизонталью угол  $\chi$  (рисунок 1.8). Составляющая  $N$  этого усилия, нормальная к поверхности скольжения, прижимает опору свода к последней, а составляющая  $Q$  в плоскости, касательной к поверхности скольжения опоры, сдвигает ее во внешнюю или внутреннюю сторону свода, что обусловлено величиной угла  $\chi$ , определяющего направление силы  $T$  к горизонтالي. Сила трения  $F$  препятствует смещению опоры свода по поверхности скольжения. Для равновесия опоры свода необходимо, чтобы выполнялось условие  $Q \leq F$ . Таким образом, максимальная устойчивость опоры свода наблюдается тогда, когда линия действия силы  $T$  проходит через его опору перпендикулярно поверхности скольжения потока сыпучего тела.

При установившемся режиме истечения сыпучего тела стохастический процесс образования и разрушения неустойчивых сводов в бункере по всей высоте потока можно заменить процессом периодического возникновения и разрушения эквивалентного неустойчивого свода. Устойчивость такого свода равна средней устойчивости всех возникающих в потоке сыпучего тела неустойчивых сводов.

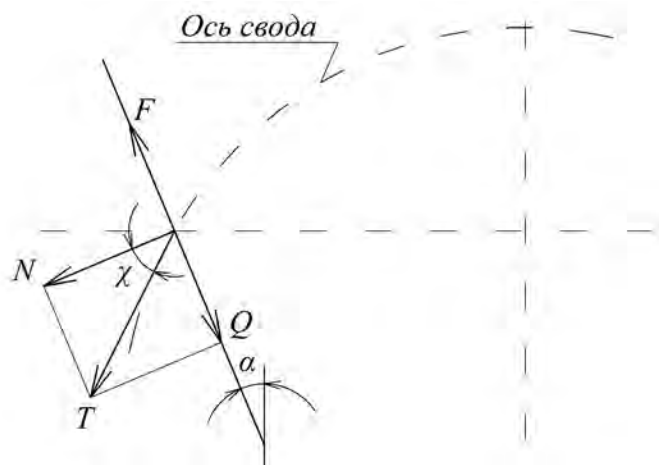


Рисунок 1.8 – Схема сил, передаваемых опорой свода поверхности скольжения

Высота расположения эквивалентного неустойчивого свода, оказывающего наибольшее горизонтальное давление на стенки емкости, в зависимости от конструктивных параметров бункеров определяется по выражению [14]:

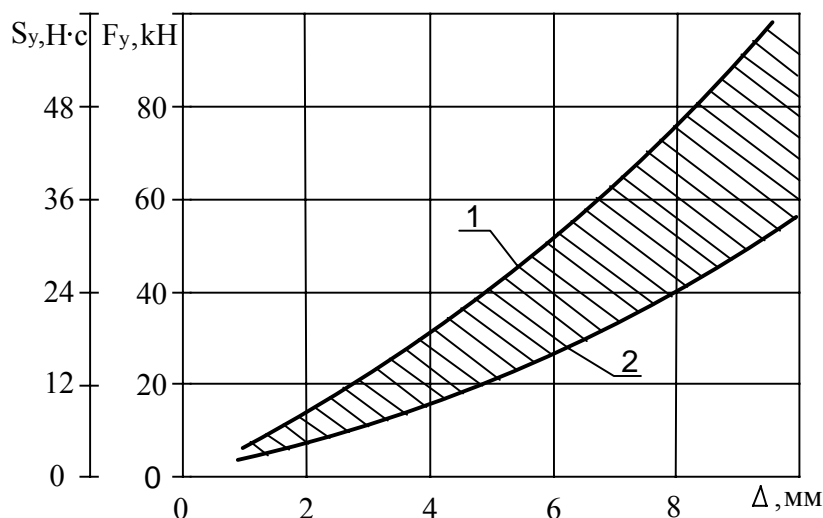
$$H_{\text{экв}} = \left[ (R_0 - R_{\text{нсв}}) (R_{\text{в}} - R_{\text{нсв}}) / ((R_0 - R_{\text{в}}) g \alpha) \right] \times \\ \times \left[ \ln \left( (R_{\text{в}} - R_{\text{нсв}}) / (R_0 - R_{\text{нсв}}) \right) + (R_0 - R_{\text{в}}) / (R_{\text{в}} - R_{\text{нсв}}) \right], \quad (1.1)$$

где  $R_0$  – радиус верхнего основания конического бункера;  $R_{\text{нсв}}$  – наибольший сводообразующий размер выпускного отверстия бункера;  $R_{\text{в}}$  – радиус выпускного отверстия конического бункера или половина ширины щели выпускного отверстия щелевого бункера.

В зоне  $H_{\text{экв}}$  предпочтительно оказывать воздействие на стенку бункера или на сыпучий материал, позволяющее в случае перехода эквивалентного неустойчивого свода в статически устойчивый восстановить истечение сыпучего материала. Например, исследования [14; 27] показывают, что эффективное разрушение устойчивых сводов достигается использованием ударного воздействия, позволяющего получить большие по величине и кратковременные по длительности усилия, создающие максимальные колебания точек очищаемой поверхности. При этом возникающие напряжения не должны превышать предела текучести материала стенки бункера.

На рисунке 1.9 [19; 27] показаны зависимости максимальных (1) и минимальных (2) средних значений силы  $F_y$  и импульса силы  $S_y$  за время ударного воздействия  $\tau$  от толщины стенки очищаемой поверхности. Максимальные средние значения силы и импульса силы соответствуют предельно допустимым, при которых механические напряжения начинают превышать предел текучести материала стенки. При значениях силы  $F_y$  и импульса силы  $S_y$  меньше, чем минимальные, сводообрушение и очистка поверхностей становятся малоэффективными [27].

Таким образом, правильный выбор зоны приложения и величины силового импульсного воздействия способствует эффективному разрушению устойчивых сводов и улучшает очистку внутренней поверхности бункера от налипшего сыпучего материала.



*Рисунок 1.9 – Зависимости максимальных (1) и минимальных (2) средних значений силы  $F_y$  и импульса силы  $S_y$  за время ударного воздействия  $\tau$  от толщины стенки очищаемой поверхности*

Например, для распространенных на мукомольных и хлебозаводах металлических осесимметричных конических бункеров емкостью  $3...5 \text{ м}^3$  с параметрами:  $H_6=2,2 \text{ м}$ ;  $R_0=1,3 \text{ м}$ ;  $R_6=0,35 \text{ м}$ ;  $\alpha=22,6^\circ$  – и муки с усредненными физико-механическими свойствами: внутренний угол трения между частицами муки  $\Psi=26,5^\circ$ ; внешний угол трения (по железу)  $\varphi=31^\circ$ ; угол укладки частиц муки  $\beta=7,5^\circ$  – высота расположения в бункере эквивалентного неустойчивого свода согласно (1.1) составляет  $H_{\text{экв}}=1,5 \text{ м}$ . От плоскости выпускного отверстия бункера это сечение отстоит на  $\Delta H_{\text{экв}}=H_6-H_{\text{экв}}=2,2-1,5=0,7 \text{ м}$  (рисунок 1.7).

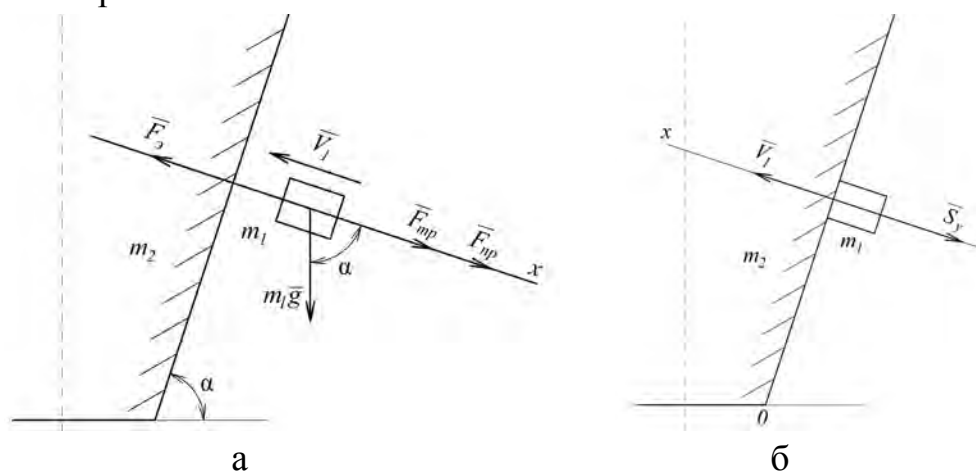
При толщине стенки бункера  $\Delta=2 \text{ мм}$  для эффективного сводообрушения численные значения силы  $F_y$  и импульса силы  $S_y$  должны лежать в диапазоне  $F_y=6,7...13 \text{ кН}$ ,  $S_y=4,8...9,6 \text{ Н·с}$  соответственно (рисунок 1.9).

Электрические ударные машины на базе двигателей с линейной траекторией ударника характеризуются простотой, компактностью, минимальной длиной кинематической цепи и в наибольшей степени приспособлены для решения поставленной задачи. Несмотря на относительное многообразие линейных электрических двигателей, на практике обычно применяются индукционно-динамические и электромагнитные ударники-побудители.

В настоящее время разработаны магнито-импульсные установки для разрушения сводов и очистки технологического оборудования. В таких установках индуктор с якорем либо плотно прижаты к внешней стороне очищаемой толчка-

ми поверхности, либо установлены с некоторым зазором и оказывают на нее ударное воздействие.

Из электромагнитных устройств в качестве сводообрушителей чаще применяются случайно приспособленные приводные электромагниты замков, защелок, мощных контакторов и т.п., изначально не предназначенные для привода импульсных побудительных устройств. Несоответствие характеристик этих изделий особенностям решаемых задач предопределяет невысокую результативность их применения и свидетельствует о необходимости создания специальных импульсных электромагнитных ударников-обрушителей. В частности, приведенные в работах [19; 28-30] результаты сопоставления основных отличительных свойств и среднего энергопотребления при сводообрушении для традиционных электромеханических и импульсных электромагнитных устройств подтверждают важность и перспективность исследований по разработке и созданию импульсных электромагнитных систем такого назначения.



а) для интервала времени  $0 - t$ ; б) для времени удара  $\tau$

Рисунок 1.10 – Расчетные схемы сил при ударе элементов «бункер – ударник»

Выработку основных рекомендаций при решении поставленных задач следует начать с рассмотрения силовых взаимодействий между сводообрушителем и бункером на произвольном импульсном цикле. Для удобства анализа пренебрежем кривизной стенки выпускного конуса и будем полагать удар плоских поверхностей прямым. Представим часть бункера с мукой, по которой производится удар, массой  $m_2$ , а якорь ЛЭМД сводообрушителя – ударником  $m_1$ , который в течение интервала времени  $0 - t$  разгоняется действием сил  $\sum F_i$  до предупредительной скорости  $V_1$ . В момент времени  $\tau = t + dt$  между элементами  $m_1$  и  $m_2$  происходит ударное взаимодействие, продолжающееся на промежутке времени  $\tau \rightarrow 0$ . Расчетные схемы взаимодействий элементов  $m_1$  и  $m_2$  на интервалах  $0 - t$  и  $\tau$  показаны на рисунке 1.10 а,б.

Баланс действующих на  $m_1$  в предударный момент времени  $t$  сил (рисунок 1.10 а) представим в виде:

$$F_{\mathcal{E}} = m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{\text{ПР}} + m_1 g \cos \alpha + F_{\text{ТР}}, \quad (1.2)$$

где  $F_{\mathcal{E}}$  – электромагнитная сила;  $F_{\text{ПР}}$  – сила возвратной пружины;  $F_{\text{ТР}}$  – сила трения;  $\alpha$  – угол между основанием и образующей выпускного конуса бункера.

Все действующие на ударник в момент времени  $t$  силы (за исключением составляющей  $mg$ ) представляются внутренними силами [51] с суммарной проекцией на ось  $x$ :  $\sum \overline{F_{ix}} = 0$ . Тогда проекция количества движения  $\sum \overline{Q_{m1x}}$  ударника  $m_1$  на ту же ось  $x$ , обусловленного действием этих сил, будет величиной постоянной  $\sum \overline{Q_{m1x}} = \text{const}$ , и они не в состоянии повлиять на него.

В момент времени  $\tau$  происходит соударение элементов  $m_1$  и  $m_2$  (рисунок 1.10 б), и за очень короткий промежуток времени  $\tau$  (время удара) скорость ударника  $m_1$  и его количество движения  $\sum \overline{Q_{m1}}$  изменяются на конечную величину  $\sum \overline{Q_{m1}} > 0$ . При этом в плоскости  $0 - 0$  соударения элементов  $m_1$  и  $m_2$  на интервале  $\tau$  возникает так называемая ударная сила  $\overline{F_y}$ . Поскольку  $F_y$  очень велика и за время удара  $\tau$  изменяется в значительных пределах, в качестве меры взаимодействия элементов  $m_1$  и  $m_2$  примем ударный импульс [53]:  $\overline{S_y} = \int_0^{\tau} \overline{F_y} dt = \overline{F_{ycp}} \tau$ ,

который является величиной конечной. Действие на ударник  $m_1$  сил (рисунок 1.10 а) во время удара также сохраняется, однако, полагая эти силы  $\overline{F_i} \ll \overline{F_y}$  неударными [51], пренебрежем их действием на промежутке  $\tau$ .

Поскольку средняя скорость  $V_{CP}$  совместного движения элементов  $m_1$  и  $m_2$  на промежутке  $\tau$  конечна, то их перемещение  $V_{CP} \cdot \tau$  при ударе представляется очень малым, которым также следует пренебречь и считать  $m_1$  и  $m_2$  во время удара неподвижными.

Результаты краткого анализа взаимодействий по рисунку 1.10 а позволяет сделать обоснованные рекомендации по определению силовых, энергетических и конструктивных параметров импульсных ЛЭМД сводообрушителей; по рисунку 1.10 б – оценить важнейший показатель машины ударного действия – выходную механическую энергию  $A_y$ .

Для приближенной оценки выходной механической энергии  $A_y$  электромагнитного сводообрушителя, обеспечивающей требуемые силовые показатели, воспользуемся теоремой импульсов. Будем считать прямой удар имеющего предударную скорость  $V_1$  якоря с массой  $m_1$  по стенке  $m_2$ , заполненного мукой бункера, неупругим и коэффициент восстановления скорости при ударе  $k_V = 0$ .

Полагая массу стенки бункера и присоединенную массу муки  $m_2 \gg m_1$ , пренебрежем приобретаемой ими в результате взаимодействия скоростью  $V_2$  и, считая время взаимодействия  $\tau$  соударяющихся элементов малым, получим:

$$m_2 \overline{V_2} - m_1 \overline{V_1} = -m_1 \overline{V_1} = \overline{F}_{ycp} \tau, \quad (1.3)$$

где  $\overline{F}_{ycp}$  – среднее за время  $\tau$  значение силы.

Знак минус означает, что векторы силы импульсного взаимодействия и скорости якоря направлены встречно. Чем меньше время соударения  $\tau$ , тем ближе среднее и амплитудное значения силы  $F_y$  и тем точнее результат, определяемый формулой (1.3). Принимая во внимание абсолютную величину показателей и умножая обе части уравнения на  $V_1$ , определим энергию  $A_y$ , необходимую для разрушения свода:

$$2 A_y = m_1 V_1^2 = \overline{F}_{ycp} \tau V_1. \quad (1.4)$$

Анализ показателей серийно выпускаемых или экспериментальных перспективных образцов электромагнитных ударных машин свидетельствует, что скорость движения якоря у них не превосходит 10 м/с, а в большинстве практических конструкций составляет в среднем 5 м/с. Тогда для бункеров с заданными показателями (толщиной стенки) при известном импульсе силы, обеспечивающем устойчивое разрушение свода, с учетом (1.4) легко определить соответствующий ему диапазон энергий сводообрушителя:  $A_y = 24 \dots 48$  Дж. В дальнейших рассуждениях будем считать, что создаваемые сводообрушители с импульсным ЛЭМД должны обеспечивать близкие к этим показатели, в частности, примем для них  $A_y = 25 \dots 50$  Дж.

### **1.1.2 Оценка возможности применения передвижных электромагнитных систем на объектах АПК (на примере погружения 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. 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 и т.п. Отличительными свойствами СЭМИС для

таких применений является передвижное исполнение, автономность энергопитания, переносная конструкция элементов системы – электромагнитной ударной машины, управляющего преобразователя, автономного источника питания.

Совершенствование перечисленных операций и процессов применением импульсных электромагнитных систем состоит не только в техническом упрощении, удешевлении, ресурсосбережении, но и в 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 магистралей.

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 других факторов [31; 32].

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; удаленность объектов между собой и от баз механизации; количество стержневых элементов, погружаемых на объекте, наличие и возможность получения 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 [31-34].

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 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.

В обычных условиях коррозия незащищенной стали стержневых элементов составляет в земле в среднем 2,5-3,0 мм за 8 лет (таблица 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.

*Таблица 1.1 – Сравнение показателей металлических элементов*

Сортамент стали	Масса стержневого элемента, кг	Время полного разрушения стержне- вого элемента, лет	Поверхность стержневого элемента, м <sup>2</sup>
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

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 в 5 раз, что увеличивает долговечность 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 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 [5; 7; 32; 35-38] 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 климатических 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, электриче-

ские). 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 линейного движения.

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 рисунке 1.11.

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

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, забивки металлических стержней вибромолотом. Машина смонтирована на базе трактора повышенной проходимости ДТ-75НВ. Обе машины сравнительно дороги и 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 [32].

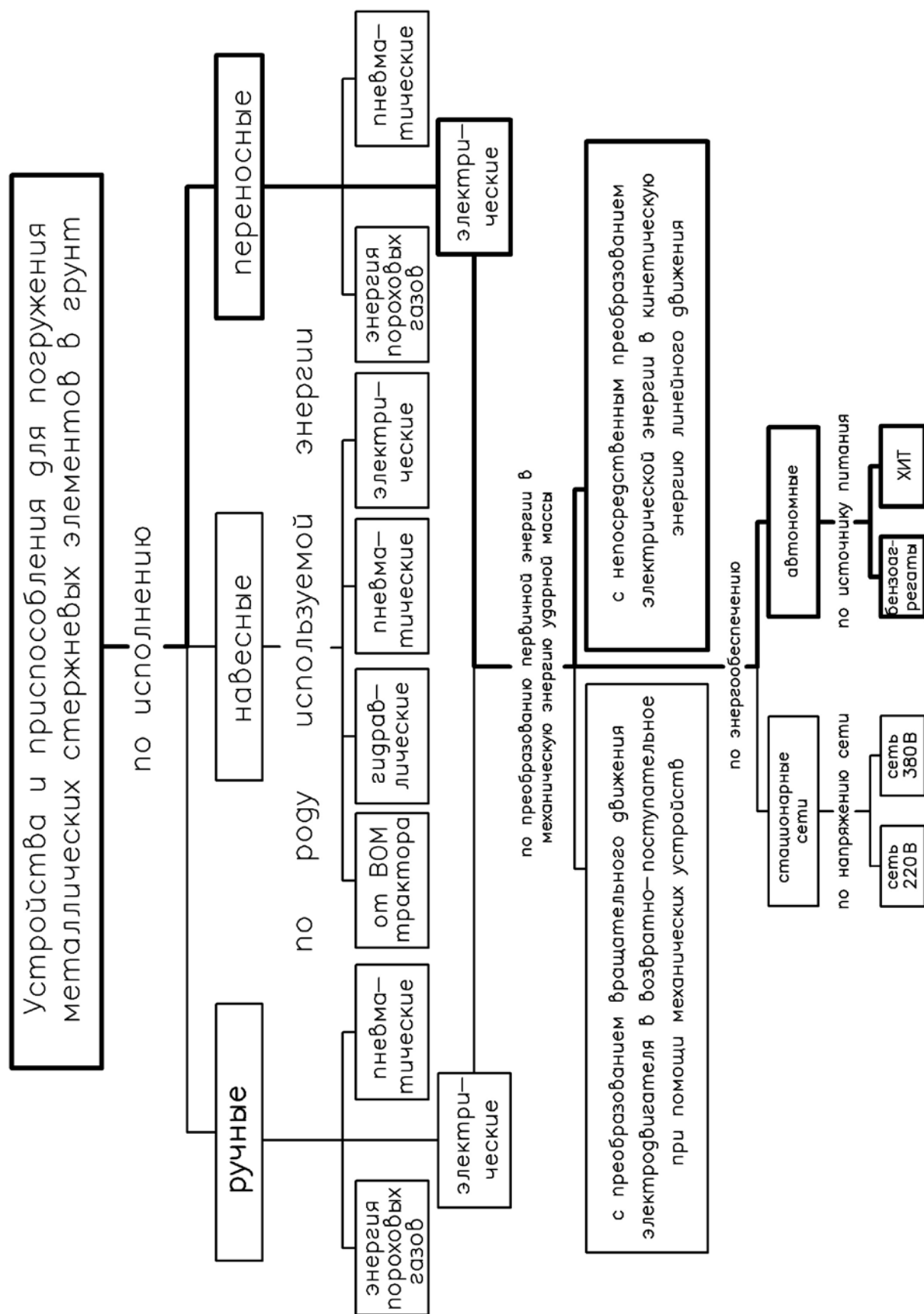


Рисунок 1.11 – Классификация устройств и приспособлений для погружения стержневых элементов в грунт

Таблица 1.2 – Техническая характеристика навесного оборудования 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

**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 удастся. 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.

Приспособление, работающее подобно копру (рисунок 1.12 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.

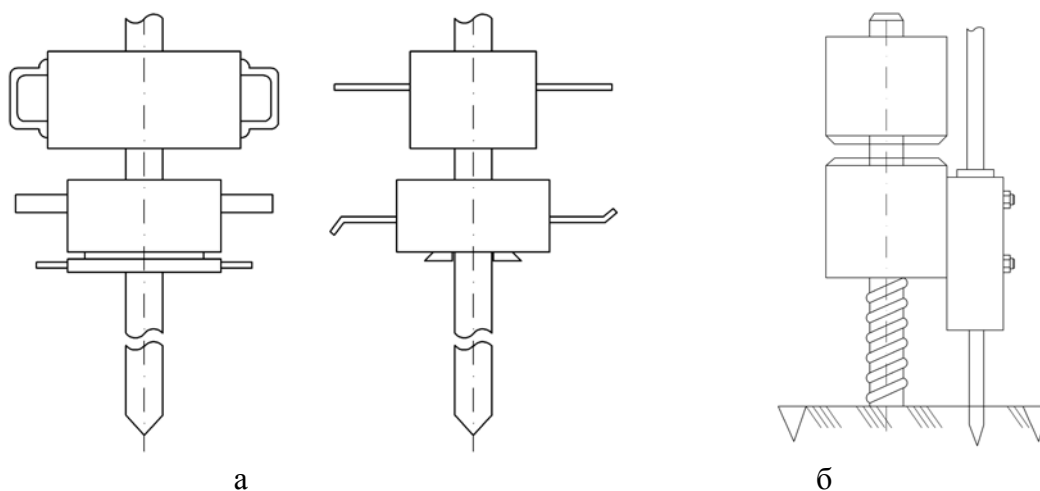


Рисунок 1.12 – Приспособления для ручного погружения стержневых элементов в грунт

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 [32].

Другое устройство, позволяющее забивать сравнительно тонкие стержневые элементы, представлено на рисунке 1.12 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 элементов переносных пневматических, гидравлических, электрических и других устройств, является наиболее предпочтительным.

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 [32; 35; 36]. 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.

Институтом горного дела СО РАН (г. Новосибирск) была разработана серия пневмоударных машин ПУМ для забивки продольно-неустойчивых металлических стержней в грунты любой плотности, включая и мерзлые [5; 32; 36]. По сравнению с другими приспособлениями машины ПУМ удобны в работе, производительны за счет большой энергии удара, имеют небольшие габариты. Их применение особенно эффективно для погружения металлических стержней в плотные грунты и в стесненных условиях строительной площадки. Существенным преимуществом по сравнению с пневмомолотками является возможность

как заглубления, так и извлечения забитых стержней. Техническая характеристика машин серии ПУМ (рисунок 1.13) приведена в таблице 1.3 [5].

*Таблица 1.3 – Техническая характеристика 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 <sup>3</sup> /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.

К недостаткам пневматических устройств можно отнести многоступенчатое преобразование энергии, значительный расход воздуха, наличие пневмосети или передвижного компрессора, повышенную шумность при выхлопе.

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 (рисунок 1.14), выполненные на базе двухтактного бензодвигателя «Дружба» [32; 35]. 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.

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 [32]. Наряду с пневматическими или ДВС выпускаются погружатели с электроприводом.

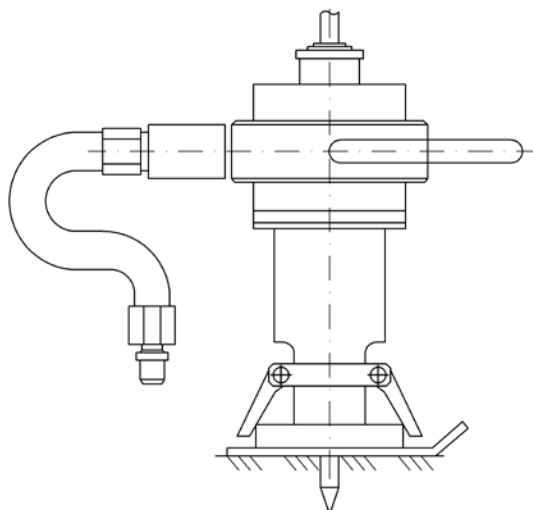


Рисунок 1.13 – Пневмоударная машина ПУМ-3

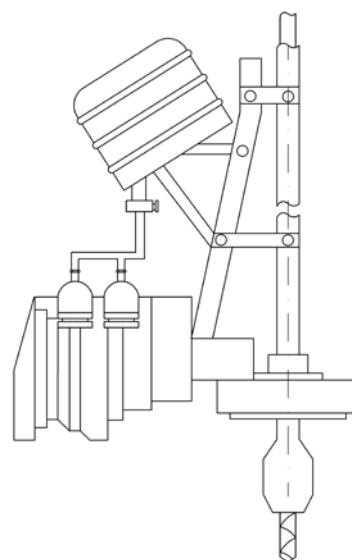


Рисунок 1.14 – Бензомоторный погружатель ПЗД-12У1

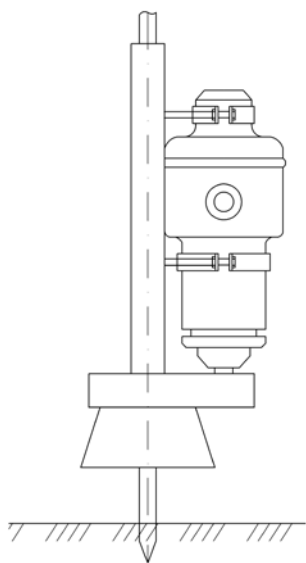
Таблица 1.4 – Техническая характеристика приспособлений с бензодвигателями для ввертывания стержневых элементов

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

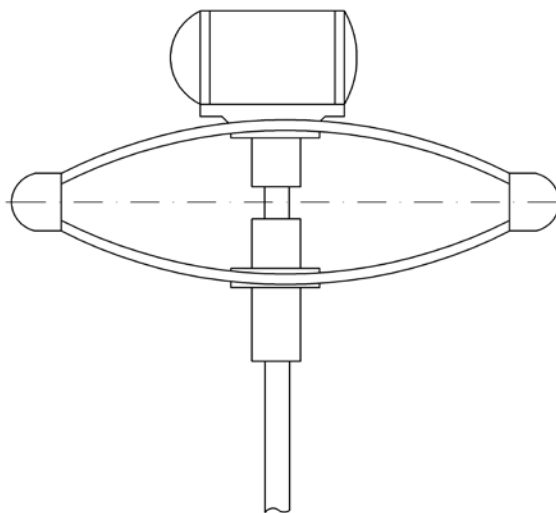
Предприятиями изготавливается электрифицированный заглубитель металлических элементов типа ПЗ-12 (рисунок 1.15), оснащенный приводом от электросверлилки типа И-18А мощностью 600 Вт при напряжении 220 В переменного однофазного тока промышленной частоты 50 Гц. Стержень пропускается гладким концом через 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 электрозаглубителями не позволяет погружать стержни на большую глубину и в плотные грунты. Большей глубины погружения можно достичь, забивая металлические стержни электромашинами ударно-вибрационного действия.

Воронежскими инженерами был разработан электровибропогружатель С-414 (рисунок 1.16) с электродвигателем мощностью 0,8 кВт для сравнительно слабых грунтов (песок) [32]. Небольшая масса приспособления позволяет одному-двум рабочим устанавливать его вместе со стержнем в рабочее положение вручную. Для более плотных грунтов (суглинков, 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.



*Рисунок 1.15 – Электрозаглубитель стержневых элементов ПЗ-12*



*Рисунок 1.16 – Электровибропогружатель стержневых элементов С-414*

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 работе [35] 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 (таблица 1.5).

Важнейшим энергетическим показателем машин ударного действия вообще и электромагнитных УМ для погружения стержневых элементов в грунт в частности служит выходная механическая энергия  $A_y$ , которая определяется кинетической энергией якоря в момент его соударения с нагрузкой. 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.

*Таблица 1.5 – Среднее потребление электрической энергии при погружении металлического стержневого элемента в грунт*

Тип машины для погружения стержней	Электрифицированный заглубитель ПЗ-12	Электро-погружатель С-414	Электро-погружатель С-642	Ударная машина с ЛЭМД
Время погружения стержневого элемента $t$ , с	300	220	150	90
Потребление электрической энергии, кДж	180	176	180	100

Для приближенного определения энергии удара  $A_y$  воспользуемся рекомендациями [52]. Уравнение, связывающее величину  $A_y$  электромагнитной машины с параметрами забиваемого стержня и характеристиками грунта, будет иметь вид:

$$A_y = [S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y] / [\eta - (\rho \cdot \sin \alpha \cdot S \Delta Y / (m_c + m_b))], \quad (1.5)$$

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

Поскольку геометрические характеристики стержневого элемента при погружении не меняются, обозначим

$$\sin \alpha \cdot S / (m_c + m_b) = \kappa_z, \quad (1.6)$$

тогда с учетом (1.5) получим

$$A_y = [S(C_y \Delta Y + C_x f_{mp} Y) \Delta Y] / [\eta - \kappa_z \rho \Delta Y]. \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) 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 формуле (1.7) 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/м<sup>3</sup> энергия удара  $A_y = 25 \dots 50$  Дж.

## 1.2 Обобщенная структурная схема импульсной электромагнитной системы для технологий АПК

К настоящему времени в области создания, совершенствования и практического использования импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями определились четыре характерные группы, классифицированные по назначению, выполняемым технологическим операциям, выходным энергетическим показателям и КПД. Подробный анализ современного уровня и тенденций развития электрических импульсных машин, в том числе прямого действия, с электромагнитными двигателями, представлен в работах [39-41].

К первой группе отнесены молотки, перфораторы, магнитобуры, применяемые для скалывания, ударно-вращательного бурения при выполнении строительно-монтажных, ремонтных работ или схожих технологических операций в других отраслях. Эта группа содержит около двадцати типов машин, часть из которых серийно выпускается предприятиями России или стран бывшего СССР [40; 41]. Отличительным для них представляется выходная энергия  $A_y = 0,7 \dots 25$  Дж, частота ударов  $n_y = 1000 \dots 3000$  мин<sup>-1</sup>, масса  $m = 12 \dots 14,5$  кг. В отдельную подгруппу выделены бетоноломы, у которых энергия  $A_y$  доходит до 50 Дж и масса – до 20 кг.

Электромагнитные ударные узлы молотков предельно просты и выполняются одно- или, для более мощных устройств, двухкатушечными; в перфораторах для поворота инструмента и реализации ударно-вращательного режима дополнительно используются коллекторные двигатели вращательного действия. Питание предусматривается от однофазной электрической сети напряжением 220 В, 50 Гц либо непосредственно, либо через разделительный понизительный трансформатор, а для формирования питающих импульсов для электромагнитного ударного узла применяется простейшая схема на полупроводниковых диодах или тиристорах. Конструктивное оформление этих машин предусматривает их переноску и удержание во время работы оператором двумя руками на весу.

Электромагнитные прессы отнесены во вторую группу, которая включает семь типоразмеров изделий и обеспечивает выходную энергию  $A_y = 3,0 \dots 250$  Дж при частоте ходов инструмента  $n_y = 360 \dots 120$  мин<sup>-1</sup>. В конструкциях преобладают однообмоточные ЛЭМД с рабочим ходом якоря до 60 мм. Возврат (холостой ход) подвижной части (якорь с оснасткой) обеспечивается упругим возвратным элементом, обычно пружиной, однако для активного, с существенным усилием обратного хода оснастки предложены двухобмоточные системы [24]. В зависимости от мощности машина подключается к одно- или трехфазной сети 380/220 В, 50 Гц через управляемый выпрямитель, который формирует в обмотке питающие импульсы с требуемыми параметрами. Конструктивно электромагнитный

пресс оформлен в виде компактного напольного или настольного станка, в котором на регулируемой (нерегулируемой) станине смонтирован импульсный ЛЭМД с оснасткой и который не предназначен для регулярной переноски, тем более удержания его руками во время работы.

Третью и четвертую группу составляют мощные электромагнитные импульсные машины – молоты – с выходной механической энергией соответственно до 1 кДж и более 1 кДж, которые насчитывают шестнадцать типоразмеров изделий. Большинство выполнено по схеме молотов двойного действия с обмотками рабочего и холостого хода. Эти группы ударных машин развивают выходную механическую энергию в диапазоне  $A_y=0,4\ldots30,0$  кДж с частотой ходов якоря-бойка  $n_y=400\ldots24$  мин<sup>-1</sup>. Уникальными в классе мощных электромагнитных ударных машин представляются молоты простого действия МЭМ-100 и МЭМ-400 с энергией удара соответственно 100 и 400 кДж.

Отличительным свойством для импульсных ЛЭМД молотов представляется длина рабочего зазора  $\delta$  и хода якоря-бойка, существенно превосходящая этот показатель у других машин и составляющая в различных конструкциях от 120 до 1000 и более миллиметров и необходимая для интенсивного разгона бойка и формирования ударных импульсов. Масса большинства изделий, выполняемых навесными на транспортное средство или шасси, составляет  $m=0,5\ldots14,3$  т, однако имеются образцы, у которых она не превосходит 100 кг и которые могут иметь переносное исполнение. Энергообеспечение большей части машин этого класса осуществляется от мощных передвижных электроустановок или стационарных сетей переменного тока с напряжением 380/220 и 660/380 В через специальные тиристорные преобразователи.

Во всех рассмотренных классах ударных электромагнитных машин применены так называемые одно- или двухобмоточные броневые цилиндрические ЛЭМД, являющиеся наиболее эффективными с точки зрения энергопреобразовательных процессов, компактными, простыми, технологичными, которые легко komponуются в конструкцию большинства машин и отвечают требованиям производственной эстетики.

Таким образом, представленный в работах [24; 39; 40; 42-45] обзор и подробный анализ результатов практического применения, перспектив и тенденций развития силовых импульсных электромагнитных машин показывает, что:

– относительное разнообразие типов известных электромагнитных ударных устройств достигается в настоящее время за счет преобладания в перечне в основном ручных машин (молотков, перфораторов), электромагнитных прессов станочной конструкции и в меньшей степени мощных молотов навесного исполнения. Все машины предназначены, как правило, для подключения к мощной стационарной электрической сети общего назначения и выполнены по конструк-

тивными схемам, обеспечивающим лишь торцевое ударное воздействие бойка на инструмент (стержень, сваю, объект), что сужает области их эффективного применения. Ударные машины с собственной массой  $m=16...80$  кг и выходной механической энергией  $A_y=0,05...1,0$  кДж, которые могут быть переносными, допускать установку в рабочее положение операторами вручную и питаться от переносных автономных источников, встречаются лишь в единичном исполнении;

– по наиболее важным для ударных машин техническим характеристикам – «энергия удара  $A_y$ », «ударная мощность  $P_y$ », удельным, на единицу массы  $m$ , энергетическим показателям  $A_y/m$ ,  $P_y/m$  и КПД, – перечисленные классы ударных машин обладают значительными потенциальными возможностями, сопоставимыми с традиционными ударными устройствами и системами, и следовательно способны составить им успешную конкуренцию в заявленных применениях. В частности, из приведенного в [1; 6] аналогичного обзора характеристик, показателей и свойств более ста типоразмеров традиционных гидropневматических и других схожих импульсных машин российского и зарубежного производства следует, что для легких молотов и переносных ударных устройств, т.е. для диапазона  $A_y=0,05...1,0$  кДж, удельная энергия удара составляет  $1,0\div6,7$  Дж/кг при среднем значении 3,43 Дж/кг, КПД –  $0,1\div0,45$  при среднем значении 0,25. Те же показатели гидроударников находятся в диапазоне, соответственно,  $1,0\div4,0$  Дж/кг, среднее значение 2,33 Дж/кг, КПД –  $0,4\div0,7$ , средняя величина 0,6. Удельная ударная мощность для всех этих машин колеблется в интервале  $0,001\div0,054$  кВт/кг при среднем значении 0,017 кВт/кг [6]. Машины ударного действия аналогичного класса с импульсными ЛЭМД [39; 40] способны обеспечить до  $4\div5$  Дж/кг, КПД колеблется в диапазоне  $0,09\div0,45$  при наиболее часто встречающихся значениях  $0,25\div0,38$ , удельная ударная мощность  $0,025\div0,0375$  кВт/кг;

– несмотря на соизмеримость значений основных энергетических показателей электромагнитных машин с характеристиками традиционных ударников, «сдержанное» отношение к сравнительно мощным ( $A_y=0,05-1,0$  кДж) электрическим импульсным машинам и ограниченное их применение в автономных системах на практике, в сравнении, например, с пневмоударниками, объясняется, на наш взгляд, не столько некоторым несовершенством силовых электромагнитов или линейных электромагнитных двигателей, сколько недостатком новых плодотворных предложений по развитию принципов построения и машин того или иного технологического назначения на базе ЛЭМД, и систем с их использованием, поскольку в основополагающих работах по силовым электромагнитным импульсным системам сделан упор на исследование именно двигателей, а примененческий аспект представлен обычно декларативно.

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 (рисунок 1.17), 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, в том числе мобильных, автономного действия, для использования на предприятиях и в технологиях АПК.

Обобщенная структурная схема СЭМИС представляется энергетической и информационной частями (каналами). Источник питания и преобразователи энергии – электрический, электромеханический и механический – образуют энергетический (силовой) канал; устройства управления преобразуемой энергией составляют информационный канал (рисунок 1.17).

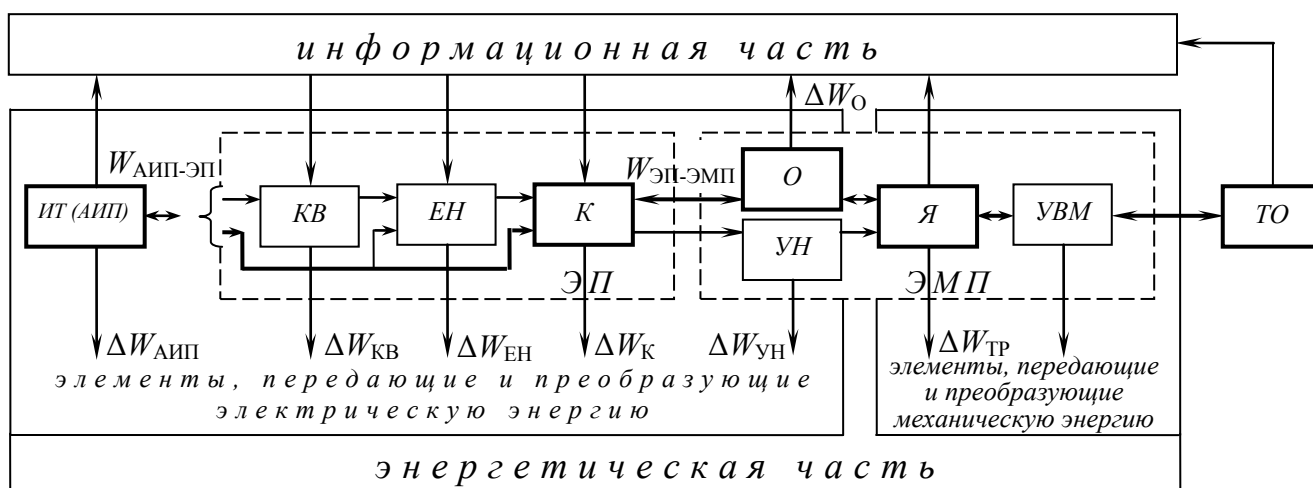


Рисунок 1.17 – Обобщенная структурная схема СЭМИС

Выделенными линиями показан минимально необходимый (базовый) набор структурных элементов, без которых СЭМИС существовать и функционировать не может. Включение в схему остальных блоков либо придает системе новые потребительские свойства и расширяет области её применения, либо поз-

воляет повысить эффективность работы частей или всей системы, например, за счет дополнительных управляющих воздействий. Двухнаправленные стрелки отражают возможность передачи энергии между структурными элементами в общем случае, в любом направлении.

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

Импульсная машина с электромеханическим преобразователем ЭМП осуществляет в СЭМИС главную энергетическую функцию системы – преобразует электрическую энергию источника в механическую энергию подвижной части (бойка, ударника, 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 подвижной 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 два неравнозначных канала управления подвижной частью преобразователя:

- электрический – по цепи обмотки *О* за счет модулирования питающих электрических импульсов мощности. Как правило, действие этого канала сопровождается обе стадии энергопреобразования ЭМП;
- механический – за счет нагружения неподвижного на первом этапе якоря некоторым противодействующим его движению усилием, действие которого скачкообразно прекращается в момент начала движения.

Электрический канал является независимым, основным каналом, без которого функционирование ЭМП невозможно. Механический же лишь дополняет электрический и влияет на эффективность процессов аккумулирования энергии в ЭМП на первой стадии энергопреобразовательного процесса. В отсутствие этого канала работоспособность системы полностью сохраняется.

Для формирования механических управляющих воздействий на неподвижный якорь на первом этапе цикла в конструкции ЭМП должен быть предусмотрен элемент нагружения УН с релейной силовой характеристикой, например, пружинный фиксатор. Функциональные возможности управления по механическому каналу расширяются, если в качестве УН применить устройство с регулируемым нагружающим усилием, например, вспомогательный электромагнит

удержания якоря. В последнем случае электрический преобразователь ЭП оснащается двумя полупроводниковыми ключами и формирует не только питающий импульс обмотки  $O$  ЭМП, но и управляющее воздействие удерживающего электромагнита. Выбором соотношения значений этих воздействий и их фазовым сдвигом в цикле обеспечивают минимизацию потерь в обмотках и повышение выходных показателей ЭМП.

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 технологическому объекту ТО. В одних СЭМИС передача обеспечивается непосредственным воздействием якоря на объект (как, например, в генераторах колебаний для наземной сейсморазведки малых глубин), в других могут использоваться специальные элементы для вывода и передачи ударных или силовых импульсов УВМ.

Особенности и свойства УВМ определяются назначением СЭМИС. Так, в электромагнитных ударных машинах для неторцевой забивки длинных, продольно-неустойчивых стержневых элементов якорь-боёк взаимодействует со стержнем не непосредственно, а через переставляемый зажимной механизм с наковальней, воспринимающий ударные импульсы якоря и передающий их стержню через его боковую поверхность в произвольном поперечном сечении. Разработаны УВМ и для передачи (вывода) неударных силовых воздействий от ЭМП к объекту. 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 СЭМИС.

Устройство питания и управления – электрический преобразователь (ЭП) – обеспечивает дискретизацию непрерывного потока мощности от источника тока (ИТ) 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, реже – транзисторный) ключ  $K$ , который в соответствии с сигналами управляющего устройства обеспечивает импульсную коммутацию обмотки  $O$  электромеханического преобразователя и источника. В автономных, тем более переносных СЭМИС мощности ИТ и нагрузки соизмеримы. И хотя источник, в частности, аккумуляторный, допускает непосредственное подключение ЭМП

для формирования питающих импульсов в обмотке  $O$ , повышенная нагрузка на батареи негативно влияет на их показатели и снижает ресурс.

В таких случаях применение в системе питания промежуточного накопителя ЕН, например, емкостного типа, обеспечивает преобразование импульсной нагрузки ЭМП в стационарную источника ИТ и повышает эффективность рабочего процесса. Как правило, накопитель выполняется моноблочным, однако в отдельных случаях представляется целесообразным секционирование батареи ЕН. При этом заряжать накопитель можно как непосредственно напряжением источника, так и через специальный вспомогательный преобразователь КВ. Включение дополнительного функционального звена, конечно, усложняет систему, но легко позволяет повысить напряжение на зажимах ЕН относительно входного от ИТ и запасаемую в накопителе энергию и представляется энергетически предпочтительным. Полностью управляемые полупроводниковые ключи К и накопители энергии ЕН обеспечивают дополнительные возможности при модулировании отдаваемых в обмотку  $O$  питающих электрических импульсов мощности и управлении характеристиками механического движения рабочего органа ЭМП.

Важнейшим функциональным элементом силовой импульсной системы (рисунок 1.17), особенно в мобильном исполнении, является первичный источник энергии – источник тока ИТ. Поскольку машинам с электромагнитомеханическими преобразователями свойственно дискретное энергопотребление и энергопреобразование, то для ИТ эти машины представляют импульсную ударную нагрузку с длительностью импульса  $0,05 \dots 0,5$  с, амплитудным значением тока  $(0,05 \dots 1,0) \cdot 10^3$  А и мгновенной мощностью в десятки киловатт. Только при условии форсированного энергообмена между источником и ЭМП обеспечиваются необходимые быстродействие и энергетические показатели импульсной электромагнитной машины. Очевидно, что свойства этого функционального элемента СЭМИС (рисунок 1.17) в значительной мере определяют выходные показатели и ЭМП, и импульсной системы в целом.

Электрические сети переменного тока общего назначения, по которым передается и распределяется около 98% всей вырабатываемой электроэнергии, позволяют питать нагрузки с перечисленными особенностями, поэтому импульсные электромагнитные машины ручного или стационарного исполнения: молотки, перфораторы, прессы, мощные навесные молоты – рассчитаны и в большинстве случаев подключаются 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 ударных машин достаточно хорошо изучено и рассматривается, например, в [24; 42; 46; 47].

На необорудованных объектах или площадках в отсутствие централизованного электроснабжения питание импульсных электромагнитных машин осуществляется от автономных источников тока [43; 49; 50]. В отдельных случаях их использование представляется оправданным, более удобным или предпочтительным и при наличии энергокоммуникаций.

### **1.3 Методы исследований силовых электромагнитных импульсных систем**

Приведенный анализ подтверждает, что силовая электромагнитная импульсная система представляется сложным, составным объектом, в котором отдельные функциональные блоки являются другими, более низкого уровня системами (подсистемами), сведенными в единое целое в соответствии с определенными принципами. Присущая СЭМИС, как и любой системе, эмерджентность не позволяет свести и представить полностью её свойства в виде простой совокупности свойств отдельных частей системы. Поэтому представляются важными задачи по изучению как сведенных воедино подсистем СЭМИС, которые существенно отличаются по содержанию и имеют разные цели, так и их взаимодействию в системе в целом.

Анализ обобщенной схемы (рисунок 1.17), сравнение структурных элементов и средств практического воплощения каждой из подсистем в отдельности свидетельствуют о существенном различии в степени их изученности, достигнутом техническом уровне, потребительских, эксплуатационных показателях, распространённости и значимости для различных отраслей техники. В частности, источники первичного электропитания: аккумуляторные батареи, бензоагрегаты или конденсаторы для емкостных накопителей – и вторичные источники питания представляют собой обширные самостоятельные классы, содержащие десятки и сотни типоразмеров изделий, доведенных до значительного совершенства и выпускаемых серийно миллионами штук, без которых немыслимы транспорт, связь, промышленное и гражданское строительство, сельское хозяйство и десятки других отраслей. Электро-магнито-механические преобразователи – ЛЭМД – импульсные силовые устройства и ударные машины на их базе хотя и достаточно широко известны, но гораздо более специфичны, менее изучены и совершенны, не являются серийно выпускаемыми, готовыми универсальными изделиями и имеют сравнительно узкую область практического применения.

Таким образом, наиболее значимый круг вопросов касается исследования электро-магнито-механических преобразователей определенного класса, а именно импульсных ЛЭМД с выходной энергией  $A_y = 0,05 \dots 1,0$  кДж, где остаются актуальными и поиск путей совершенствования собственно двигателей, их энергопреобразовательных процессов, рабочих циклов, способов управления для

повышения выходных показателей, и ударных или силовых импульсных машин различного назначения с использованием ЛЭМД.

Необходимость подобного подхода диктуется тем, что линейные электромагнитные двигатели хотя и известны как самостоятельный класс специальных электрических машин, однако в отличие от электродвигателей вращательного движения, например, асинхронных, не имеют регламентированной шкалы номинальных мощностей или исполнений по способу монтажа и степени защиты; ГОСТ на импульсные электрические машины с линейной траекторией подвижных частей не предусмотрен, они не являются унифицированными сборочными единицами и не рассчитаны на массовое применение в характерных изделиях в машиностроительных отраслях.

Значительная степень интеграции ЛЭМД в конструкцию машины импульсного действия того или иного назначения не позволяет разрабатывать саму машину и двигатель к ней по отдельности и требует зачастую нетрадиционных подходов и эвристических решений при проектировании. При этом немаловажным ограничивающим области эффективного применения фактором как электромагнитных импульсных машин, так и автономных систем в целом, наряду с их относительно низкими удельными показателями, является отсутствие воплощенных эффективных способов и средств отбора и вывода энергии из ЛЭМД, ограничивающее функциональность и существующий перечень лишь машинами с торцевым соударением или передачей силовых импульсов инструменту или среде.

В отличие от импульсных электромагнитных машин изучение остальных структурных элементов системы – первичных источников питания, конденсаторов или накопителей не нацелено на поиск путей совершенствования самих серийно выпускаемых, распространенных изделий, а лишь предполагает выявление свойственных именно мобильным автономным СЭМИС особенностей рабочих процессов, режимов взаимодействия и выработку практических рекомендаций по их наиболее эффективной организации в системе.

Математическое моделирование является основным характерным методом исследования сложных систем, который применительно к изучению СЭМИС обобщенно представляется следующим образом.

Процессы функционирования отдельных частей СЭМИС, предполагаемых динамическими системами, задаются последовательностью однозначно определяемых явлений или событий, т.е. формализуются. Взаимодействие подсистем в рабочем процессе представляется передачей сигналов между ними, определяемой четырьмя моделями: формирования выходного сигнала подсистемы с учетом условий её функционирования; сопряжения отдельных подсистем СЭМИС с каналами передачи сигналов между ними; изменения характеристик и преобра-

зования сигнала в процессе его прохождения через канал; функционирования подсистемы при поступлении на вход сигнала.

Для формализации сопряжения входы (выходы) отдельных подсистем заменяются совокупностью фиктивных «элементарных» входов (выходов) по числу характеристик, определяющих формируемые сигналы, причем эти характеристики полагаются независимыми друг от друга и передаются по «элементарным каналам», соединяющим входы – выходы соответствующих подсистем. Сопряжение частей системы задается соотношениями, в которых некоторому входу  $i$ -го элемента ставится в соответствие выход  $j$ -го элемента, связанные между собой «элементарным каналом». Поскольку отдельные подсистемы СЭМИС содержат, в свою очередь, не менее двух элементов, то для их описания еще потребуются как соответствующая одноуровневая схема сопряжения, так и схема сопряжения второго уровня для определения связей между подсистемами. Дальнейшее, при необходимости, объединение подсистем в более крупные потребует трехуровневую и последующие схемы сопряжения.

Таким образом, математическое моделирование разрабатываемых СЭМИС и полная имитация явлений и процессов функционирования в целом представляется очень сложной задачей.

Метод последовательных приближений и использование в исследованиях физических моделей позволяет упростить задачу, преодолеть трудности или парадоксы в применении системных методов и путем оперирования неполными или ограниченными представлениями о составных частях СЭМИС постепенно добиваться более адекватного знания обо всей системе. Здесь при исходном рассмотрении изучаемого сложного объекта первоначальные параметры его основных элементов или параметры сопряжения принимаются, например, по результатам частичного моделирования либо даже априорно. Последующие уточнения получаются посредством сравнения значений функциональных и структурных характеристик системы, устанавливаемых экспериментально и имитационным моделированием. Все это обеспечивает возможность определять поправки к первоначальным значениям параметров изучаемой системы и добиваться их требуемой точности последовательными приближениями.

## 2 УДАРНЫЕ МАШИНЫ С ИМПУЛЬСНЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

### 2.1 Обоснование магнитной системы импульсного ЛЭМД

При обосновании конструкции электромагнитной машины для погружения электродов в грунт необходимо выбрать рациональный тип магнитной системы ЛЭМД, который в значительной мере определяет конструкцию и параметры машины. Проведенные исследования [24; 46; 48; 53-56] дают основания считать, что наиболее приемлемым в качестве привода ударных машин является цилиндрический броневого электромагнитный двигатель, обладающий высокими энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления. При этом из существующего относительного многообразия типов магнитных систем таких двигателей в настоящей работе для краткого сопоставления выбраны лишь три самые характерные и представляющие практический интерес для создаваемой машины конфигурации магнитной системы ЛЭМД: с притягивающимся якорем, с втягивающимся и с комбинированным (рисунок 2.1).

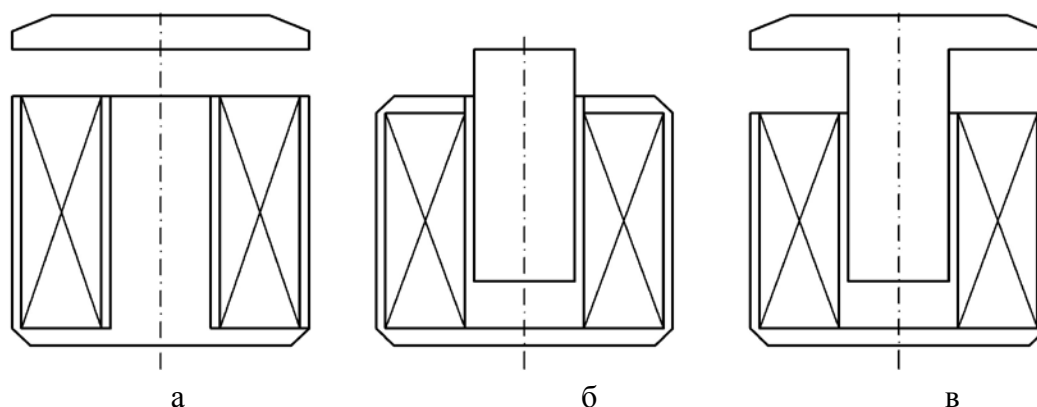


Рисунок 2.1 – Магнитные системы цилиндрических ЛЭМД с притягивающимся (а), втягивающимся (б), комбинированным якорем (в)

Потенциальные возможности двигателей с представленными магнитными системами удобно сопоставить, сравнив, например, механизм формирования пондеромоторной силы и наиболее показательные силовые и энергетические характеристики статического режима ЛЭМД [24; 45; 57]. Результаты таких исследований подробно рассмотрены в работах [24; 45]. В частности, в [24] показано, что сила тяги ЛЭМД с притягивающимся якорем (рисунок 2.1 а) обусловлена магнитным потоком в рабочем зазоре и потоками выпучивания. Потоки рассеяния между средним полюсом и ярмом не участвуют в создании тягового усилия и приводят к потере МДС. В ЛЭМД втяжного типа (рисунок 2.1 б) тяговое усилие обусловлено магнитными потоками: в рабочем зазоре, рассеяния и выпучи-

вания. Площадь рабочего зазора вдвое меньше, чем у ЛЭМД с притягивающимся якорем.

С целью максимального использования магнитного потока системы, увеличения запасаемой магнитной энергии, исключения паразитных зазоров, увеличения поверхности якоря, взаимодействующего с ярмом, в ряде работ [24; 46; 48; 53-56] предложены ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами (рисунок 2.1в). Исследование и анализ статических характеристик магнитных систем трех типов [24; 45; 48] показывают, что двигатели с притягивающимся и втягивающимся якорем существенно уступают по тяговому усилию ЛЭМД с комбинированным якорем (рисунок 2.1в) в начале хода в 4 раза, в конце хода в 1,2 раза.

Сравнение магнитных систем по интегральной работе  $A_u$  [24; 45] выявило, что значение  $A_u$  ЛЭМД с комбинированным якорем превосходит  $A_u$  двигателя с притягивающимся якорем в 3 раза. При одинаковой массе  $m_\Sigma$  удельные показатели (максимальное усилие  $F_{эм}$  и интегральная работа  $A_u$  на единицу массы активных материалов) ЛЭМД с притягивающимся и втягивающимся якорем существенно уступают аналогичным показателям двигателя с комбинированным якорем (таблица 2.1) [24; 48].

Таблица 2.1 – Удельные показатели электромагнитных двигателей

Тип магнитной системы	Критерии, %	
	$F_{эм}/m_\Sigma$	$A_u/m_\Sigma$
С притягивающимся якорем	80	32,4
С втягивающимся якорем	52	43,6
С комбинированным якорем	91	66,4

Анализ магнитного КПД исследуемых линейных двигателей в функции рабочего зазора и тока показал, что магнитный КПД ЛЭМД с комбинированным якорем на 10-15% выше, чем у ЛЭМД с притягивающимся якорем.

Исследования и сравнительный анализ магнитных систем свидетельствуют, что ударные машины на базе ЛЭМД с комбинированным якорем обладают необходимыми удельными энергетическими показателями, позволяют получать высокую частоту ударов бойка, имеют приемлемые для переносных устройств габариты и массу.

## 2.2 Оптимальные геометрические соотношения в магнитных системах однообмоточных броневых цилиндрических ЛЭМД

Применение в приводе ударных машин импульсных линейных электромагнитных двигателей предполагает расчет их основных конструктивных параметров (геометрических размеров магнитопровода, обмоточных данных и т.д.)

по заданным выходным параметрам машины. Оптимальные соотношения этих параметров оказывают непосредственное влияние на процессы энергопреобразования в ЛЭМД, на показатели использования его активных материалов и на величину совершаемой им механической работы.

Важнейшим энергетическим показателем машин ударного действия служит выходная механическая энергия  $A_y$  (или энергия удара якоря), которая определяется его кинетической энергией в момент соударения с нагрузкой.

Сравнительный анализ различных методов расчета основных конструктивных параметров ЛЭМД [24; 46; 48; 53-56] показывает, что обоснование оптимальных значений длины обмотки  $l_k$  и радиуса якоря  $r_l$  наиболее полно отражено в работе [24]. Здесь в качестве примера приведен краткий расчет сводообрушителя с энергией  $A_y=25\ldots50$  Дж [19], который выполнен при следующих допущениях: сечение стали вдоль магнитной цепи неизменно; магнитопровод при нулевом рабочем зазоре ( $\delta=0$ ) насыщен, при начальном ( $\delta=\delta_H$ ) не насыщен; ток во время движения якоря остается неизменным, режим работы ЛЭМД кратковременный.

В качестве базисного размера магнитопровода двигателя принят радиус втяжной части якоря  $r_l$  (рисунок 2.2).

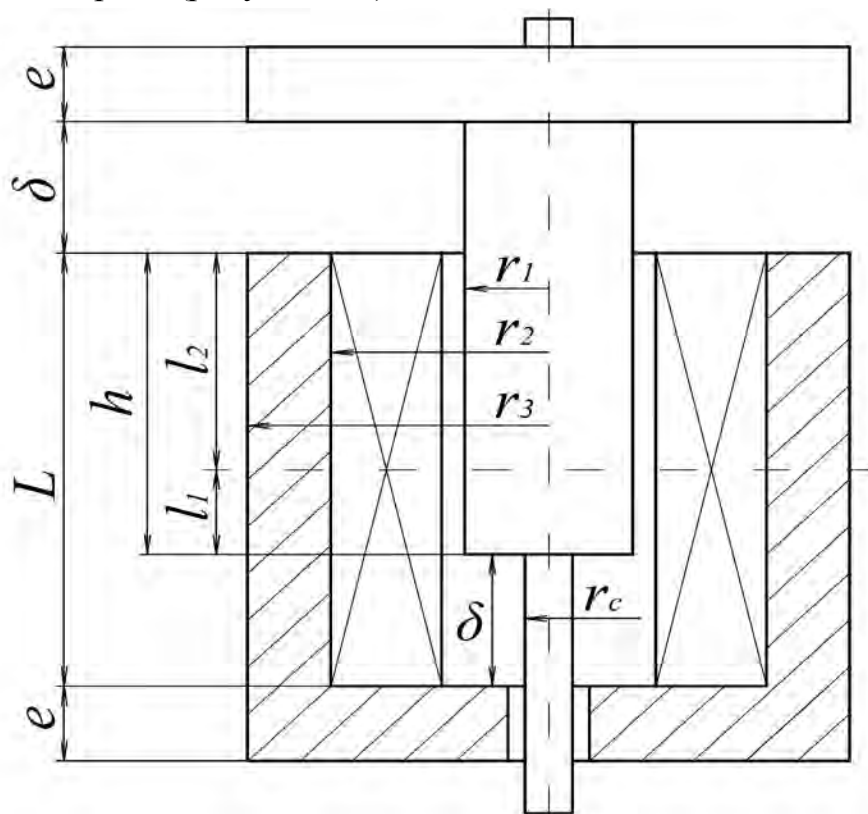


Рисунок 2.2 – Расчетная конструктивная схема импульсного ЛЭМД

$$r_l = \sqrt[3]{(A_H / 3\pi B_B a_1 b_1 b_2)^2}, \quad (2.1)$$

где  $A_H$  – интегральная работа ЛЭМД;  $B_B$  – базисное значение магнитной индукции ( $B_B = 1 \text{ Тл}$ );  $a_1, b_1, b_2$  – постоянные коэффициенты.

Поскольку интегральная работа  $A_H$  является показателем статического режима, а геометрические размеры ЛЭМД сводообрушителя должны определяться исходя из показателей  $A_Y = 25 \dots 50$  Дж динамического режима, то для установления соотношения между  $A_H$  и  $A_Y$  воспользуемся принципом взаимности [24], являющимся одним из обобщенных методов научного познания физических процессов в динамических системах. Тогда получим:

$$A_Y = 0,5 A_H, \text{ или } A_H = 2 A_Y, \quad (2.2)$$

$$a_1 = \sqrt{2 K_T K_{3M} \tau \alpha' / (ПВ \rho_\tau)}; b_1 = \sqrt{(x-1)[1+(x-1)/y]}; b_2 = \bar{B}_K (1-q) - 0,5 \bar{\psi}_H, \quad (2.3)$$

где  $K_T$  – коэффициент теплоотдачи;  $K_{3M}$  – коэффициент заполнения обмотки;  $\rho_\tau$  – удельное сопротивление провода;  $\tau$  – превышение температуры;  $ПВ$  – продолжительность включения;  $\alpha'$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи ( $\alpha' = 0,9 \dots 2,4$ );  $x, y$  – безразмерные параметры ( $x = r_2/r_1 = 1,5 \dots 1,6$ ;  $y = l_K/r_1 = 2 \dots 3$ );  $\bar{B}_K$  – относительное значение индукции магнитопровода при  $\delta = 0$ ;  $\bar{\psi}_H$  – относительная величина начального потокосцепления;  $q$  – постоянный коэффициент.

$$q = 0,5(\alpha + \beta \bar{B}_K^4 / 3 + \xi \bar{B}_K^8 / 5) / (\alpha + \beta \bar{B}_K^4 + \xi \bar{B}_K^8), \quad (2.4)$$

где  $\alpha, \beta, \xi$  – коэффициенты аппроксимации.

С учетом принятых значений параметров  $x$  и  $y$  внешний радиус обмотки  $r_2$  и ее длина  $l_K$ :

$$r_2 = (1,5 \dots 1,6) r_1; l_K = 3 r_1. \quad (2.5)$$

Наружный радиус статора и толщина фланца:

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, e = 0,5 r_1. \quad (2.6)$$

Радиус нижнего направляющего стержня [24]:

$$r_C = 0,32 r_1. \quad (2.7)$$

Объемы активных материалов двигателя  $V_D$ , обмотки  $V_M$ , магнитопровода  $V_{CT}$  и якоря  $V_Y$ :

$$V_D = \pi r_1^3 (x^2 + 1)(y + 2\bar{e}); V_M = \pi r_1^3 y(x^2 - 1); V_{CT} = \pi r_1^3 (x^2 + 2y + 1); \\ V_Y = \pi r_1^2 (l_K + e(1 + x^2)). \quad (2.8)$$

## 2.3 Расчет статических тяговых характеристик

Статические тяговые характеристики ЛЭМД позволяют на стадии проектирования предварительно определить возможности машины, установить диапазон изменения тяговых электромагнитных сил и ходов.

В настоящее время расчет статических тяговых характеристик электромагнитных машин успешно реализуется на ПК с использованием современного комплекса программ. Основным достоинством таких программ является возможность рассчитывать тяговые характеристики электромагнитных машин с различной конфигурацией магнитной цепи, что позволяет добиваться оптимальных проектных решений в минимальные сроки. Примером служит комплекс *Elcut*, который позволяет решать двумерные осесимметричные краевые задачи, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции (потенциала). Расчет статической тяговой силы, действующей на тела, заключенные в заданном объеме, осуществляется программой с использованием выражения

$$F = 0,5 \oint \left( \overline{H}(\overline{B} \cdot \overline{n}) + \overline{B}(\overline{H} \cdot \overline{n}) - \overline{n}(\overline{H} \cdot \overline{B}) \right) ds, \quad (2.9)$$

где интегрирование ведется по поверхности, окружающей заданный объем;  $\overline{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\overline{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\overline{n}$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Если использование комплекса *Elcut* затруднено, например, из-за сравнительно высокой стоимости, для расчета статических тяговых характеристик магнитной цепи ЛЭМД (рисунок 2.2) можно воспользоваться методами, основанными на теории цепей. Анализ методов расчета [24; 44; 50; 60-62] показал, что для магнитной цепи ЛЭМД (рисунок 2.2) основой может служить методика, предложенная в [24].

Обычно расчет статических тяговых характеристик для выбранной конфигурации магнитной цепи ведется в предположении, что длина  $\delta$  рабочих воздушных зазоров относительно невелика и не превосходит радиуса втяжной части якоря  $r_l$ , то есть  $\delta \leq r_l$ . С целью увеличения выходной механической энергии  $A_y$  следует изменить рабочий ход якоря до значения  $\delta = (1,4 \dots 1,5)r_l$ . Для такого соотношения  $\delta / r_l$  расчет характеристик  $F(\delta)$  выбранной магнитной системы по этой методике еще не проводился.

Увеличение длины рабочих зазоров уменьшает их проводимость, магнитные потоки и создаваемые ими усилия  $F_1$ ,  $F_2$  и повышает эти показатели для потоков рассеяния. При этом изменение зазора  $\delta$  в диапазоне  $(1,5 \dots 1,0)r_l$  не оставляет такое перераспределение однозначным. Поскольку для электромагнитной ударной машины вообще и сводообрушителя с ЛЭМД, в частности, оценка статических режимов и характеристик не является определяющей, то здесь отмеченное перераспределение магнитных потоков и усилий рабочих и нерабочих зазоров предлагается учесть эмпирическим коэффициентом  $k_\delta$ . Тогда расчет может быть представлен следующим образом.

Уравнение нейтрали, с помощью которого определяются величины  $l_1$  и  $l_2$ :

$$l_2^2 (1-n) / \ln r - l_2 (G_1 + nG_2 + 2h / \ln r) + h^2 / \ln r + lG_1 = 0, \quad (2.10)$$

где  $G_1, G_2$  – относительные значения магнитной проводимости первого и второго рабочих зазоров;  $h = l_1 + l_2$ ;  $l = l_0 / r_1 = h + \delta$ ;  $r = r_2 / r_1$ ;

$$G_1 = 1,04 + (1 - r_c^2) / \delta;$$

$$G_2 = 0,52r_{\text{я}} + 1,04r + 1/\delta(r_{\text{я}}^2 - r^2) + (\delta/e + 1)^{-1}(1,28r_{\text{я}} + 2,56r),$$

где  $r_c$  – отношение радиусов стержня и якоря;  $r_{\text{я}} = r_3 / r_1$ ;

$$n = 1 - (\Phi_C + H\delta G_1) / B,$$

где  $\Phi_C$  – относительный магнитный поток направляющего стержня;  $H$  – относительное значение суммы напряженностей магнитного поля якоря и ярма при  $x=0$ ;  $B=\Phi$  – относительное значение индукции якоря при  $x=0$ ;  $\delta$  – относительное значение рабочего зазора;

$$\Phi_C = r_c^2 B_C, H = H_A / H_B; B = B_A / B_B; \delta = \delta_A / r_1,$$

где  $H_B, B_B$  – базисные значения напряженности и магнитной индукции;

$$H_B = B_B / \mu_0, \text{ где } \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м; } B_B = 1 \text{ Тл.}$$

Введем обозначения:

$$a_1 = l_1^2 / \ln r + l_1^4 r_{\mu} / 6 \ln^2 r; \quad a_2 = l_1 + l_1^3 r_{\mu} / 3 \ln r;$$

$$b_1 = l_2^2 / \ln r + l_2^4 r_{\mu} / 6 \ln^2 r; \quad b_2 = l_2 + l_2^3 r_{\mu} / 3 \ln r;$$

где  $r_{\mu} = dH/d\Phi$ .

Относительное значение удельной МДС обмотки

$$f = B / (b_1 + b_2 G_2) + H. \quad (2.11)$$

Абсолютное значение тока обмотки

$$I_A = (B_{\delta} l_0 / \mu_0 W) f, \quad (2.12)$$

где  $W$  – число витков обмотки.

Тяговые усилия для первого и второго воздушных зазоров

$$F_1 = -1/2 \varphi^2 a_2^2 (dG_1 / d\delta), \quad (2.13)$$

$$F_2 = -1/2 \varphi^2 b_2^2 (dG_2 / d\delta), \quad (2.14)$$

где  $\varphi = B / (b_1 + b_2 G)$ .

Тяговое усилие, обусловленное потоками рассеяния

$$F_3 = f\varphi a_1. \quad (2.15)$$

Суммарная сила тяги

$$F_{\Sigma} = k_{\delta} (F_1 + F_2 + F_3), \quad (2.16)$$

где  $k_{\delta}$  – эмпирический коэффициент:  $k_{\delta} = 1$  при  $\delta \leq r_1$ ;  $k_{\delta} = 0,65 \dots 0,7$  при  $\delta > r_1$ .

Базисное значение силы тяги

$$F_B = \pi r_l^2 B_\delta^2 / \mu_0. \quad (2.17)$$

По формулам (2.13)-(2.16) рассчитываются зависимости силы тяги от величины рабочих зазоров при неизменном значении тока.

Расчет проводится в следующем порядке:

- 1 Для ряда произвольно заданных значений максимальной индукции якоря  $B$  с помощью уравнения 2.10 определено положение нейтрали, т.е. рассчитаны значения длин первого и второго участков  $l_1$  и  $l_2$ .
- 2 Для каждого значения  $B$  при известных  $l_1$  и  $l_2$  рассчитаны величины  $H$ ,  $r_\mu$ ,  $\varphi$ ,  $f$ , а затем построено семейство характеристик  $f=f(B)$  для различных  $\delta$ .
- 3 При заданных токах  $I=const$  определены соответствующие им  $f_i=const$  и проведены в виде прямых линий. Точки пересечения прямых линий и кривых  $f(B)$  определили значения индукции якоря  $B$  для данного тока при различных значениях зазора. С использованием полученных значений индукции по формулам (2.13)-(2.16) рассчитана тяговая характеристика ЛЭМД.

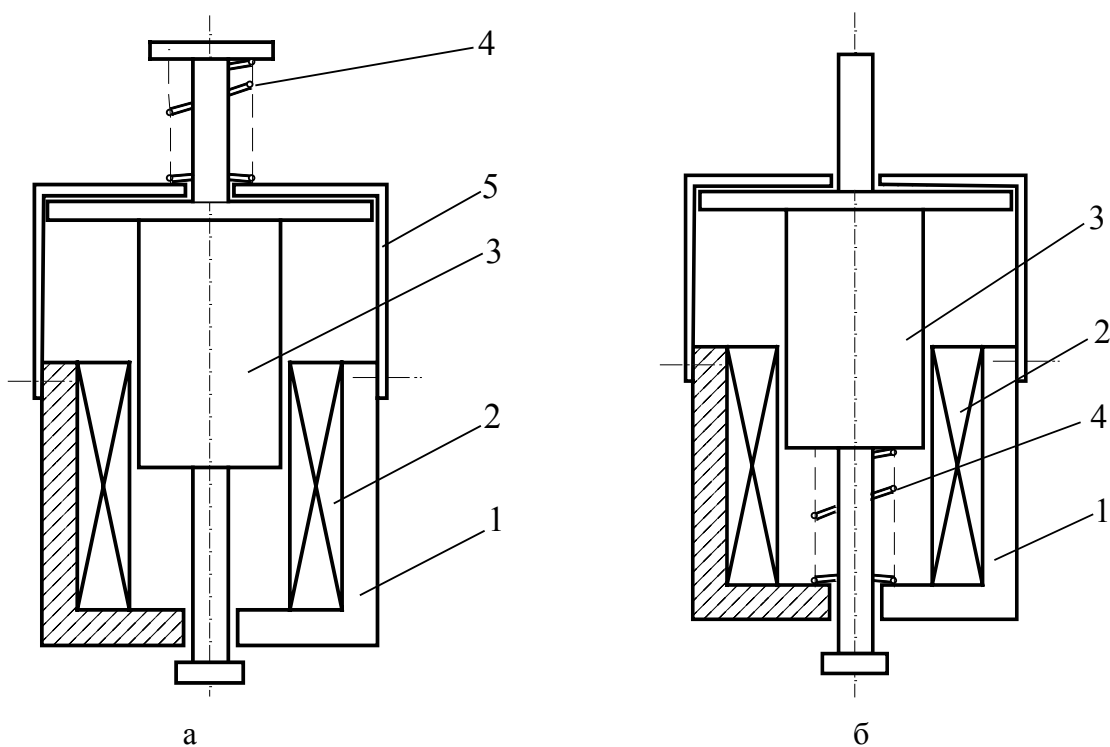
## 2.4 Конструктивные схемы ЛЭМД

### 2.4.1 Конструктивные схемы осесимметричных цилиндрических ЛЭМД с комбинированным якорем и несколькими рабочими зазорами

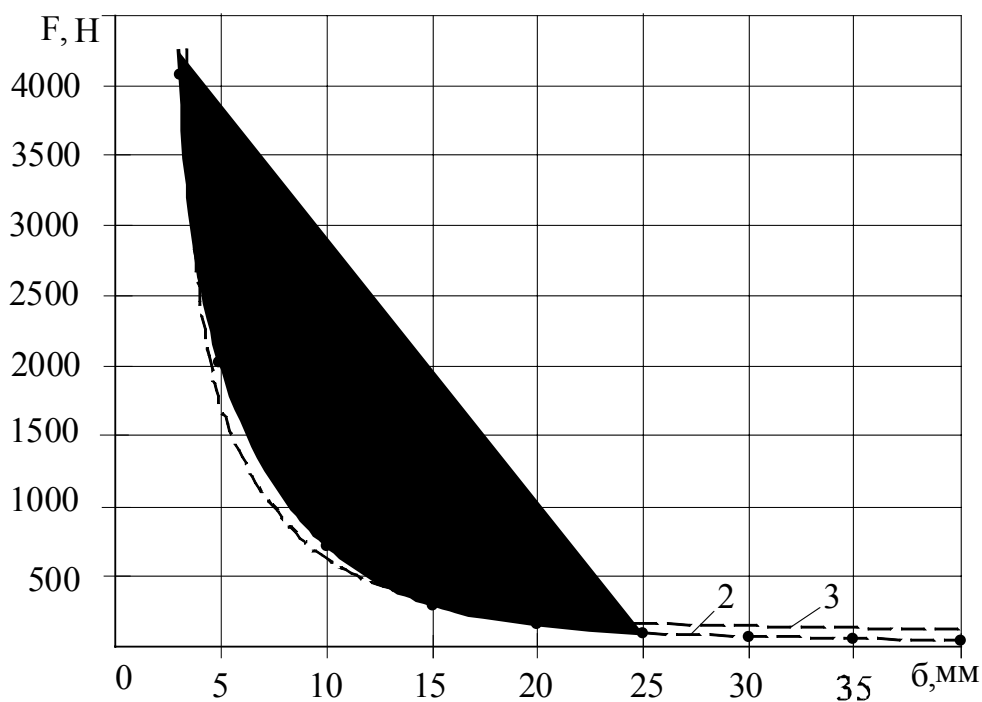
В работах [24; 50] показано, что основными конструктивными элементами ударных машин с ЛЭМД бронзового типа с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем являются статор 1, обмотка возбуждения 2, цилиндрический якорь 3, возвратная пружина 4, направляющий корпус 5 (рисунок 2.3 а, б). Якорь может перемещаться в осевом направлении в направляющих втулках, установленных в статоре 1 и направляющем корпусе 5. Возвратная пружина 4 размещена в верхней части ЛЭМД (рисунок 2.3 а) и закрыта кожухом.

Для обеспечения специальных условий работы ЛЭМД возвратная пружина 4 может располагаться внутри машины. Однако при ее повреждении в таком двигателе необходима будет его полная разборка.

Возвратная пружина ЛЭМД [50] выбирается так, чтобы ее силовая характеристика соответствовала тяговой характеристике двигателя. Требования к пружине и особенности ее выбора рассмотрены в работах [50; 62].



*1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – комбинированный якорь; 4 – пружина*  
*Рисунок 2.3 – Конструкция ЛЭМД с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем с внешней (а) и внутренней (б) пружиной*



*Рисунок 2.4 – Статические экспериментальные (1 – при  $\delta=r_1$ ; 2 – при  $\delta=1,5r_1$ ) и расчетная (3) тяговые характеристики ЛЭМД при  $I=15A$*

В рабочем режиме при подаче на обмотку двигателя импульса напряжения от специального преобразователя (глава 3) якорь 3, сжимая пружину 4, втягива-

ется внутрь обмотки. По окончании питающего импульса якорь под действием пружины возвращается в исходное состояние.

В работах [24; 50] установлено, что бóльшая интегральная работа  $A_H$  обеспечивает и бóльшую механическую энергию ЛЭМД. Повышения интегральной работы  $A_H$  ЛЭМД можно добиться увеличением электромагнитной силы  $F_{\text{Э}}$ , действующей на якорь, величины рабочего зазора  $\delta$ , на котором осуществляется действие силы  $F_{\text{Э}}$ , либо одновременным увеличением  $F_{\text{Э}}$  и  $\delta$ .

Согласно рекомендациям [24] для ЛЭМД такого типа, используемого, например, в приводе прессового оборудования, рациональная величина рабочего зазора  $\delta$  не должна превосходить радиуса втяжной части якоря  $\delta \leq r_l$ . Однако для ЛЭМД в приводе ударных машин с целью максимального повышения кинетической энергии в момент удара целесообразно увеличение рабочего зазора  $\delta$  при неизменной конструкции машины. Этот способ повышения выходных энергетических показателей машины представляется наиболее предпочтительным, поскольку обходится минимальными конструктивными доработками ЛЭМД. В частности, такой подход для увеличения энергии удара для сравнительно мощных ЛЭМД автономных переносных молотов с  $A_y = 200 \dots 400$  Дж рассмотрен в работе [50], где выбрано  $\delta \leq 2r_l$ . Для ЛЭМД, питаемых от стационарной сети переменного тока, например, сводообрушителей с энергией  $A_y = 25 \dots 50$  Дж, этот подход может считаться новым. Предлагаемое изменение длины рабочего зазора с  $\delta = r_l$  до  $\delta = 1,4 \dots 1,5r_l$  увеличивает не только длину разгона якоря, но и обеспечивает возрастание объемов рабочих воздушных зазоров  $V_{\delta}$ , в которых на этапе трогания якоря аккумулируется, а на этапе его рабочего хода преобразуется в механическую работу магнитная энергия. Очевидно, больший объем  $V_{\delta}$  позволяет запасти больше энергии и обеспечить лучшие выходные показатели сводообрушителя.

Для сравнительной оценки влияния увеличения, против известного, длины рабочего хода якоря на показатели статического ( $A_H$ ) и динамического ( $A_y$ ) режимов ЛЭМД выполнены экспериментальные исследования физической модели ЛЭМД при  $\delta = r_l$  и  $\delta > r_l$  по методике [24; 50]. Некоторые результаты сравнения представлены на рисунке 2.4. Из него видно, что характеристика двигателя с увеличенным рабочим зазором ( $\delta = 1,5r_l$ , кривая 2) является продолжением основной характеристики ( $\delta = r_l$ , кривая 1), что приводит к повышению интегральной работы  $A_H$ . Экспериментальное исследование динамических характеристик (глава 5) подтвердило, что по сравнению с исходным вариантом при  $\delta = r_l$  механическая энергия на выходе ЛЭМД с увеличенным зазором  $\delta = 1,5r_l$  возросла в 1,3 раза.

Повышение выходной механической энергии  $A_y$  с целью максимального повышения эффективности разрушения сводов может достигаться без увеличе-

ния рабочего хода якоря за счет интенсификации процесса аккумуляции магнитной энергии в индуктивностях ЛЭМД на этапе трогания при неподвижном якоре [24; 50]. В работе [50] обоснована эффективность данного способа и установлена взаимосвязь между скоростными, силовыми и временными параметрами ЛЭМД молота с простейшей тяговой характеристикой  $F_{\Sigma}(\delta)=const$ , обеспечивающей равноускоренное движение якоря:

$$t_{ДВ} = m_{я}^2 / \sqrt{F_0(k-1)/2\delta_0}, \quad V = \sqrt{2F_0\delta_0(k-1)/m_{я}}, \quad (2.18)$$

где  $F_0$  – сила сопротивления движению якоря в момент трогания;  $\delta_0$  – начальный воздушный зазор;  $m_{я}$  – масса якоря;  $t_{ДВ}$  – время равноускоренного движения якоря;  $k$  – коэффициент, определяемый отношением конечной индуктивности к начальной,  $k>1$ .

Из выражений следует, что при увеличении удерживающего усилия  $F_0$  на этапе трогания якоря увеличивается его конечная скорость и уменьшается время движения при одинаковой величине хода  $\delta_0$ , что позволяет получить большую механическую энергию за рабочий цикл в сравнении с обычным ЛЭМД.

Возможность применения формул (2.18) для оценки показателей ЛЭМД (рисунок 2.3 а) следует рассматривать с учетом его следующих отличий:

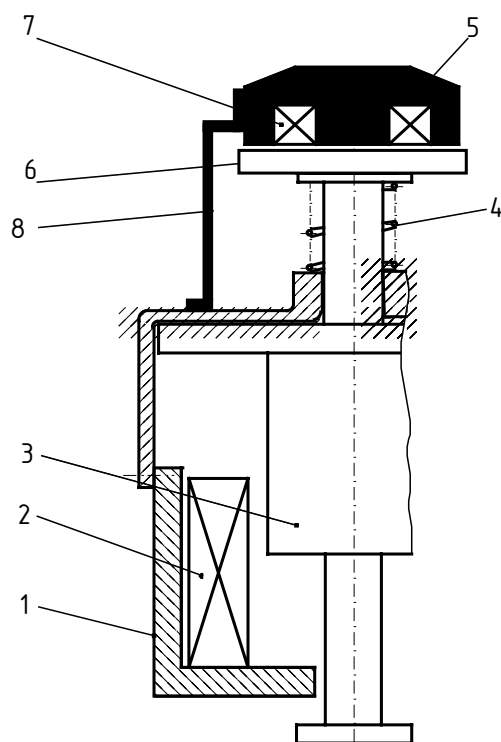
- электромагнитная сила тяги  $F_{\Sigma}$  здесь не является неизменной величиной и нелинейно меняется (возрастает) по ходу якоря, что исключает его равноускоренное движение при срабатывании;
- в рассматриваемой конструктивной схеме усилие пружины  $F_{ПР}$  и удерживающего устройства  $F'_0$  всегда направлены согласно и суммируются, то есть  $F_0 = F_{ПР.НАЧ} + F'_0$ . Поэтому статическая характеристика удерживающего устройства, например, вспомогательного электромагнита  $F'_0(i_{ОБМ})$ , должна соответствовать характеристике пружины  $F_{ПР}(\delta)$  и проходить через начало координат «ток  $i_{ОБМ}$  – сила  $F'_0$ »;
- значение удерживающей силы  $F_0$ , задаваемой в (2.18), не может быть любым и ограничено пределами: минимальное определяется начальным усилием возвратной пружины  $F_0 > F_{ПР.НАЧ}$ , и тогда следует выбрать  $F'_0 = (0, 1 \dots 0, 2) F_{ПР.НАЧ}$ ; максимальное зависит от величины электромагнитной силы  $F_{\Sigma ТРОГ}$ , обеспечивающей трогание якоря при заданном начальном зазоре  $\delta$ , что определяется способом питания обмотки и параметрами питающего импульса. Очевидно, что для рассматриваемой конструктивной схемы рабочий цикл возможен, если  $F_0 < F_{\Sigma ТРОГ}$ , а влиять на его эффективность можно, если  $F_{ПР.НАЧ} < F_0 < F_{\Sigma ТРОГ}$ . Таким образом, выражения (2.18) могут быть использованы лишь для очень приближенной оценки показателей ЛЭМД сводообрушителя с конструктивной схемой, показанной на рисунок 2.3 а. Вместе с тем экспериментальные исследова-

дования этого способа повышения удельных выходных показателей таких ЛЭМД ударных машин приведенные, например, в [50], подтвердили его эффективность.

Практическая реализация данного способа предполагает управление двигателем не только по электрическому, но и дополнительно по механическому каналу и связана с разработкой специальных удерживающих устройств, нагружающих якорь противодействующим усилием на этапе трогания.

Анализ рабочих процессов ЛЭМД, реализующих принцип повышения динамической эффективности за счет устройств удержания якоря до начала движения, позволил сформулировать основные требования к ним. Устройства удержания должны иметь релейную или близкую по форме статическую характеристику «усилие удержания – ход»; допускать возможность регулирования силы сопротивления движению до начала движения якоря; потреблять для своей работы небольшую мощность, не изнашиваться и не увеличивать уровень шума [50].

Пружинные механические и подобные им фиксаторы не удовлетворяют сформулированным требованиям и не могут рекомендоваться к применению в сводообрушителях. Интерес представляют способы и устройства электромагнитного удержания якоря ЛЭМД, рассмотренные в [50; 63]. В частности, в [50] предлагаются конструктивные схемы ЛЭМД с общими с устройствами удержания магнитопроводами и источниками МДС. Однако сведений о достаточном практическом использовании этих систем нет. Проведенные нами предварительные экспериментальные исследования динамических характеристик таких моделей показали, что негативное шунтирующее действие ферромагнитного направляющего корпуса на магнитные потоки верхнего рабочего зазора здесь преобладает, и заявленного увеличения выходных показателей у таких ЛЭМД добиться трудно. Поэтому при разработке варианта конструкции сводообрушителя, управляемого для улучшения выходных показателей одновременно и по электрическому, и по механическому каналам, за основу принята конструктивная схема двигателя с электромагнитным удержанием [63], показанная на рисунке 2.5.



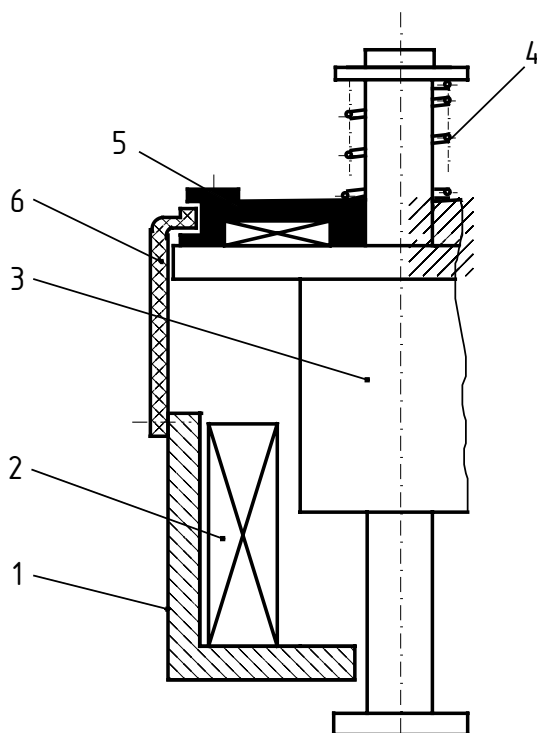
*1 – магнитопровод; 2 – обмотка ЛЭМД; 3 – якорь; 4 – возвратная пружина;  
5 – цилиндрический электромагнит; 6 – гайка; 7 – обмотка электромагнита;  
8 – цилиндрический корпус*

*Рисунок 2.5 – Конструкция ЛЭМД с устройством  
электромагнитного удержания якоря*

Устройство размещено в верхней части ЛЭМД, содержащего магнитопровод 1, обмотку 2, якорь 3, возвратную пружину 4, и представляет собой цилиндрический электромагнит 5 с внешним притягиваемым якорем 6. Обмотка 7 удерживающего электромагнита 5 питается, например, от однофазной сети через управляемый выпрямитель, позволяющий регулировать ток и усилие удержания. Недостатком такой компоновки машины, увеличивающим габариты, массу и снижающим ее удельные показатели, представляется наличие специальной гайки-якоря 6 с развитой торцевой поверхностью и цилиндрического корпуса 8 для установки электромагнита удержания 5.

Для улучшения этой компоновки нами предложена конструктивная схема ЛЭМД с электромагнитным удержанием для сводообрушителя, показанная на рисунке 2.6. Здесь роль якоря вспомогательного электромагнита 5 выполняет на этапе трогания плоская верхняя часть комбинированного якоря 3 ЛЭМД, а силовой элемент 8 вовсе отсутствует. Увеличение рабочей поверхности притяжения  $S$  вспомогательного электромагнита 5 за счет увеличения его радиального размера позволяет уменьшить высоту и облегчить электрический режим его обмотки. Для исключения шунтирующего действия направляющего корпуса 6 на магнитный поток верхнего рабочего зазора, ухудшающего показатели сводообрушителя,

предпочтительней выполнить этот элемент из неферромагнитных материалов, например, цветных металлов, фторопласта, стеклотекстолита и т.п.



*1 - магнитопровод; 2 – обмотка ЛЭМД; 3 – якорь; 4 – возвратная пружина;  
5 – цилиндрический электромагнит; 6 – неферромагнитный  
направляющий корпус*

*Рисунок 2.6 – Усовершенствованная конструкция ЛЭМД с устройством электромагнитного удержания якоря*

По сравнению с исходной (рисунок 2.5) предлагаемая компоновка сводобрушителя обеспечивает ему лучшие массогабаритные характеристики и создает предпосылки к дополнительному повышению удельных энергетических показателей машины.

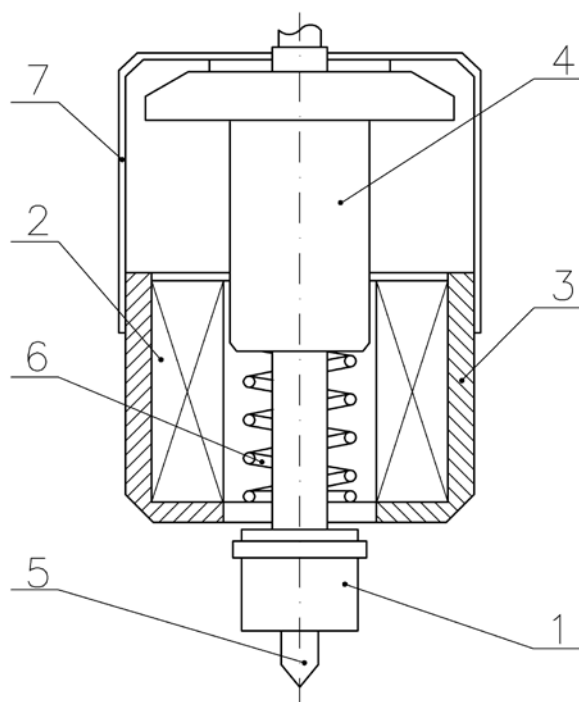
#### **2.4.2 Конструкция импульсного ЛЭМД со сквозным осевым каналом, комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами**

Существенным отличительным признаком конструкции ЛЭМД ударной машины, например, для забивки продольно-неустойчивых стержней [64], является сквозной осевой канал и переставляемый по стержню зажимной механизм, позволяющий предотвратить его неустойчивость.

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 вво-

димые 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 рисунке 2.7. В статоре 3 помещена обмотка 2. Цилиндрический якорь 4 комбинированной формы может перемещаться в осевых направляющих втулках, установленных в статоре 3 и направляющем корпусе 7. Возвратная пружина 6 размещена в нижней части ЛЭМД. Для смягчения ударов якоря в предельных положениях служат резиновые буферы (на рисунке не показаны).



*1 – наковальня; 2 – обмотка; 3 – статор; 4 – якорь; 5 – забиваемый стержень;  
6 – возвратная пружина; 7 – направляющий корпус*

*Рисунок 2.7 – Конструкция линейного электромагнитного двигателя с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем*

При подаче на обмотку 2 двигателя импульса напряжения от источника питания якорь 4, сжимая пружину 6, втягивается внутрь обмотки и наносит удар по наковальне 1 со стержнем 5. По окончании питающего импульса якорь под действием пружины возвращается в исходное состояние. Далее циклы повторяются.

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  $P_y = A_y n$ . Значение  $n$  зависит от нескольких факторов: массы якоря  $m$ , силовой характеристики возвратной пружины, формы тяговой характеристики  $F_\delta(\delta)$  ЛЭМД. При этом масса якоря является определяющей величиной, зависящей от назначения машины. Возвратная пружина ЛЭМД выбирается так, чтобы ее силовая характеристика соответствовала тяговой характеристике двигателя. Опыт проектирования и эксплуатации электромагнитных приводов с упругими возвратными элементами [50; 62] показывает, что для ЛЭМД переносных машин целесообразно использовать цилиндрические пружины сжатия [50]. Такие пружины обладают малой массой, высокой надежностью, они удачно komponуются в конструкцию двигателя, просто рассчитываются.

На рисунке 2.8 показаны типичные формы характеристик электромагнитного двигателя  $F_\delta = f(\delta)$  и пружины  $F_{np} = f(x)$ . Силовая характеристика пружины линейна во всем диапазоне  $\delta$ . При этом работоспособность двигателя обеспечивается в том случае, если характеристика пружины  $F_{np} = f(x)$  располагается ниже тяговой характеристики двигателя (рисунок 2.8, линия 3) при всех значениях  $\delta$ .

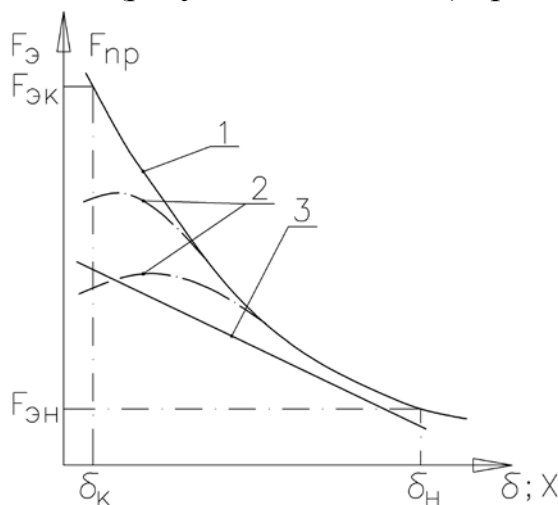


Рисунок 2.8 – Силовые статические характеристики  $F_\delta = f(\delta)$  импульсного ЛЭМД (1,2) и  $F_{np} = f(x)$  возвратной пружины (3)

Тяговая характеристика ЛЭМД  $F_\delta(\delta)$  имеет нелинейный гиперболический характер; электромагнитное усилие  $F_{эк}$  двигателя при малых зазорах  $\delta_k$  резко возрастает и во много раз превосходит начальное  $F_{эк} \gg F_{эН}$ . Значительная величина  $F_{эк}$  при малых зазорах  $\delta$  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 [50]

$$n=1/(t_{сраб}+t_{возв}). \quad (2.19)$$

Показанная на рисунке 2.8 характерная кривая 1 тягового усилия  $F_y=f(\delta)$  для ЛЭМД ударной машины не является рациональной. С целью повышения ударной мощности  $P_y$  следует изменить характеристику  $F_y=f(\delta)$  так, чтобы снизить  $F_{эк}$  (рисунок 2.8, кривая 2). Это способствует уменьшению времени возврата  $t_{возв}$  якоря и повышению ударной мощности

$$P_y=A_y/(t_{сраб}+t_{возв}). \quad (2.20)$$

Для получения требуемой формы тяговой характеристики необходимо увеличить длину якоря на  $\Delta l_y$  (рисунок 2.9), что приведет к снижению тягового усилия  $F_{эк}$  в области малых зазоров  $\delta$  [50].

Для количественной оценки влияния  $\Delta l_y$  на показатели ЛЭМД – начальное  $F_{эн}$ , максимальное  $F_{эм}$  усилие, интегральную работу  $A_u$  – проведены исследования статических тяговых характеристик магнитных систем ЛЭМД с  $\Delta l_y=0$ ;  $\Delta l_y=0,2\delta$ ;  $\Delta l_y=0,3\delta$  в программном комплексе *Elcut* 5.1.

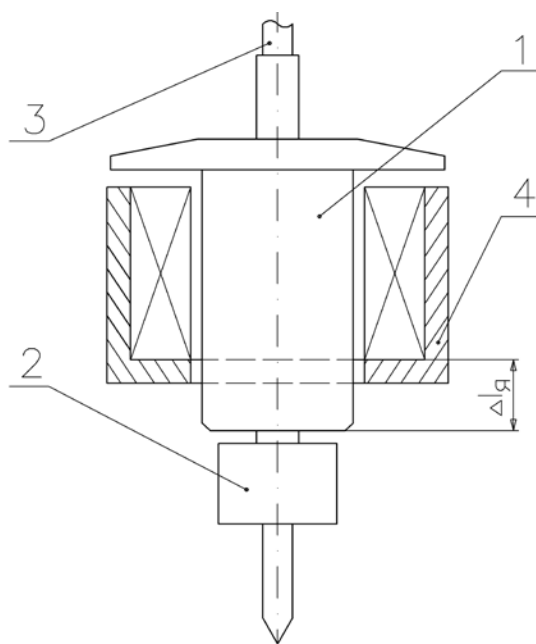


Рисунок 2.9 – Магнитная система ЛЭМД с увеличенной длиной якоря

На рисунке 2.10 приведены статические тяговые характеристики исследованных магнитных систем двигателей. При сравнении за базисный принят ЛЭМД с  $\Delta l_y=0$  (рисунок 2.10, кривая 1), у которого максимальное усилие достигается при  $\delta=0$ , что в динамике приводит к временному «залипанию» бойка и уменьшению частоты ходов УМ.

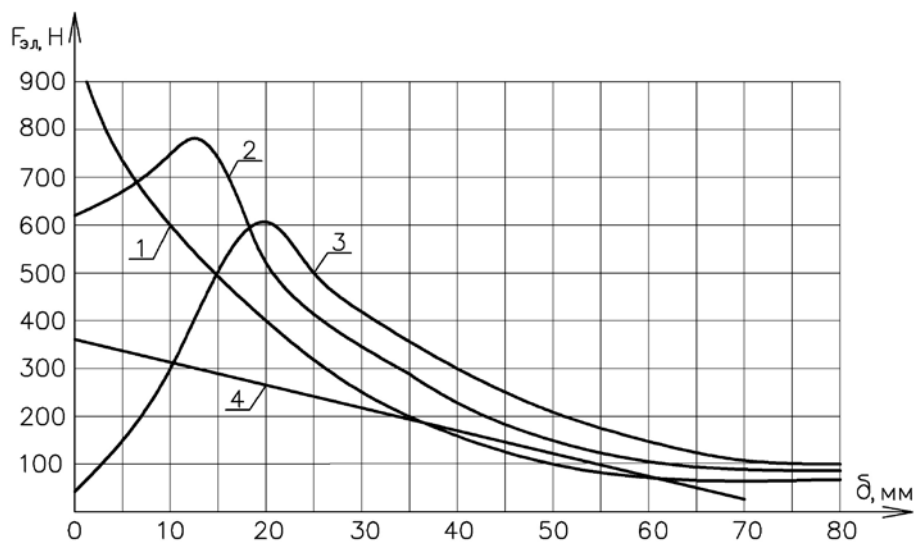


Рисунок 2.10 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД

В случае чрезмерно большой величины  $\Delta l_{я} > 0,3\delta$  наблюдается существенное снижение максимального усилия  $F_{эм}$  при малых зазорах (рисунок 2.10, кривая 3), что объясняется перераспределением составляющих тягового усилия.

ЛЭМД с величиной  $\Delta l_{я} = 0,2\delta$  развивает большее максимальное усилие (рисунок 2.10, кривая 2), которое в момент удара уменьшается на 20-30% по сравнению с базисным, предотвращая «залипание» якоря.

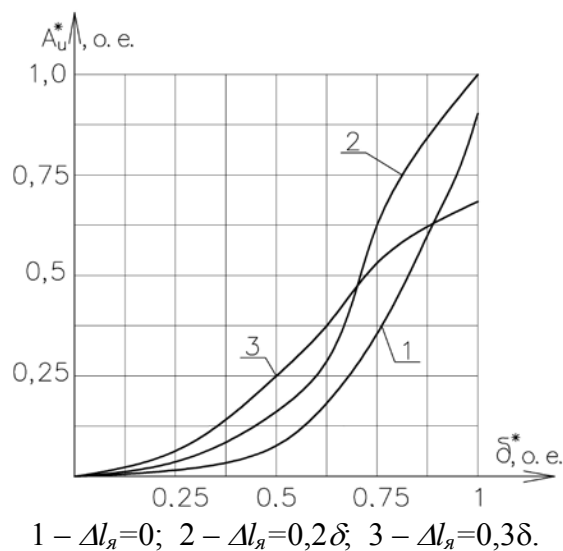


Рисунок 2.11 – Влияние  $\Delta l_{я}$  на относительную интегральную работу  $A_u^*$

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  $\delta$  найдены площади  $S$  под кривыми статических сил тяги, взятыми по рисунку 2.10. Далее построены семейства кривых  $A_u^* = f(\delta)$  (рисунок 2.11), при этом интегральная работа и зазор представлялись в относительных единицах.

Оценка  $A^*_u$  ЛЭМД на всем интервале перемещения якоря от максимального  $\delta=\delta_n$  до нулевого  $\delta=0$  под действием электромагнитной силы  $F_\delta$  показала, что двигатель с  $\Delta l_{\text{я}}=0,2\delta$  имеет повышенную относительную интегральную работу  $A^*_u$  (рисунок 2.11, кривая 2). Это объясняется увеличенным начальным усилием  $F_{\text{эн}}$ , в сравнении с двигателем с  $\Delta l_{\text{я}}=0$  (рисунок 2.11, кривая 1), и максимальным усилием  $F_{\text{эм}}$ , в сравнении с ЛЭМД с  $\Delta l_{\text{я}}=0,3\delta$  (рисунок 2.11, кривая 3). Низкими значениями  $A^*_u$  обладает двигатель с  $\Delta l_{\text{я}}=0,3\delta$ , что объясняется значительным снижением тягового усилия  $F_{\text{эк}}$  в области малых зазоров и уменьшением доли работы  $A^*_u$ , совершаемой в последней четверти хода якоря. Основные удельные показатели исследуемых ЛЭМД приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Относительные показатели ЛЭМД с различной величиной  $\Delta l_{\text{я}}$

Величина $\Delta l_{\text{я}}$	$F^*_{\text{эн}}$ , о.е.	$F^*_{\text{эк}}$ , о.е.	$F^*_{\text{эм}}$ , 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 (рисунок 2.7). При работе в ударном режиме корпус испытывает значительные механические нагрузки. С целью снижения массы электромагнитной УМ 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.

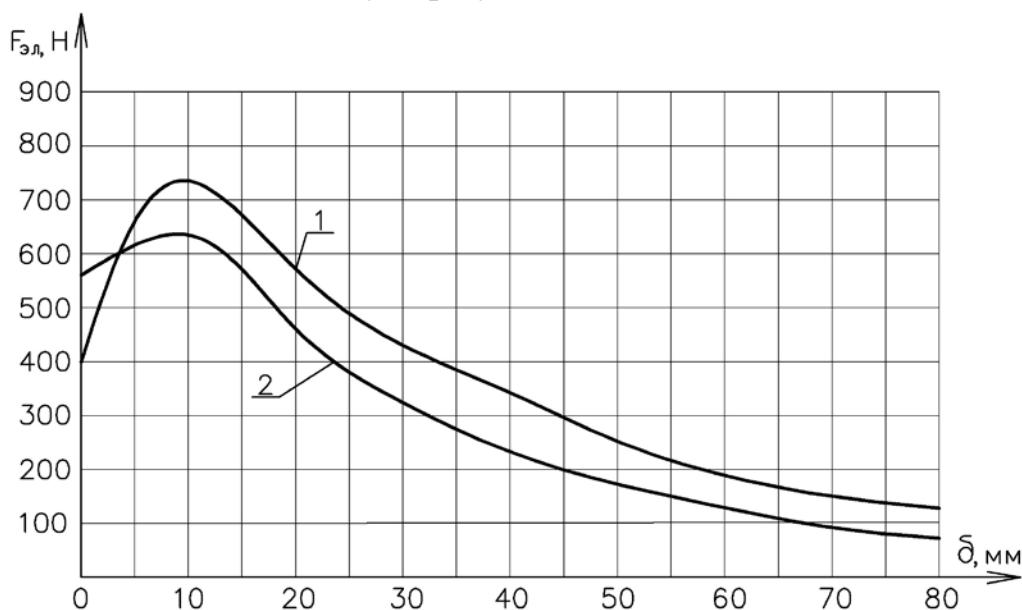
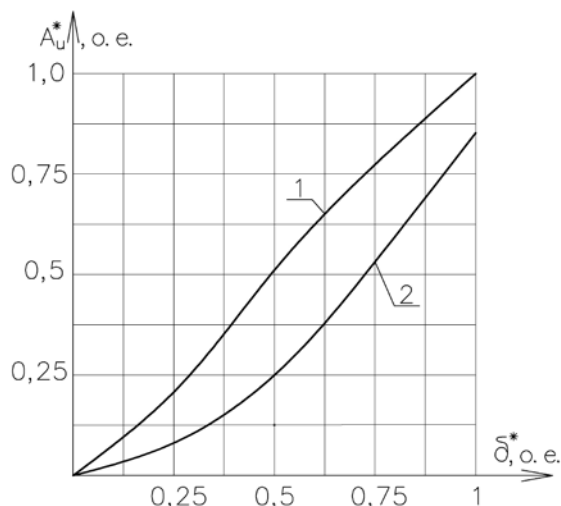


Рисунок 2.12 – Статические тяговые характеристики ЛЭМД с ферромагнитным (1) и неферромагнитным (2) направляющими корпусами

Сравнительный анализ статических тяговых характеристик двигателей с ферромагнитным – стальным (рисунок 2.12, кривая 1) и неферромагнитным – дюралюминиевым (рисунок 2.12, кривая 2) направляющими корпусами показал, что ЛЭМД со стальным НК имеет большее начальное тяговое усилие  $F_{эн}^l$ , превосходящее  $F_{эн}^2$  на 40 %, что обусловлено перераспределением магнитного потока в верхнем зазоре. Однако для двигателей с ферромагнитным направляющим корпусом характерно меньшее конечное усилие  $F_{1эк}=0,9F_{2эк}$ .



1 – ферромагнитный НК; 2 – неферромагнитный НК

Рисунок 2.13 – Влияние материала направляющего корпуса на относительную интегральную работу  $A_u^*$

При проведении сравнительного анализа ЛЭМД по относительной интегральной работе (рисунок 2.13) было установлено, что  $A_u^*$  двигателя с НК из ферромагнитного материала на 22 % выше.

## 2.5 Устройства согласования и передачи механической энергии в системе «двигатель – рабочий орган»

### 2.5.1 Устройство передачи и регулирования механической энергии в системе «импульсный ЛЭМД – бункер»

Основой сводообрушителя является линейный электромагнитный двигатель, генерирующий за счет возвратно-поступательных движений якоря силовые ударные импульсы, которые следует эффективно передавать в среду (сыпучий материал). В связи с этим необходимым элементом сводообрушителя является узел согласования и передачи энергии (УСП) – устройство, обеспечивающее передачу силового импульса в среду посредством воздействия на поверхность бункера. Его конструкция может быть различной.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к УСП.

- 1 Эффективная, с минимальными потерями передача механической энергии от ЛЭМД в среду.
- 2 Равномерное распределение нагрузок на стенку бункера при ударе.
- 3 Обеспечение при ударе прогиба стенки бункера в пределах упругой деформации с возбуждением в ней собственных колебаний.
- 4 Отсутствие отрицательного воздействия на прочность бункера.
- 5 Простое конструктивное исполнение.

На рисунке 2.14 а,б,в показаны конструктивные схемы устройства передачи механической энергии и возможные способы его соединения с якорем ЛЭМД. УСП состоит из ударника 2, выполненного в форме плоской шайбы с жестко прикрепленной к нему накладкой 3, твердость материала которой не должна превышать твердость материала стенки бункера и резинового буфера 4, служащего для дополнительной фиксации ударника в заданном положении.

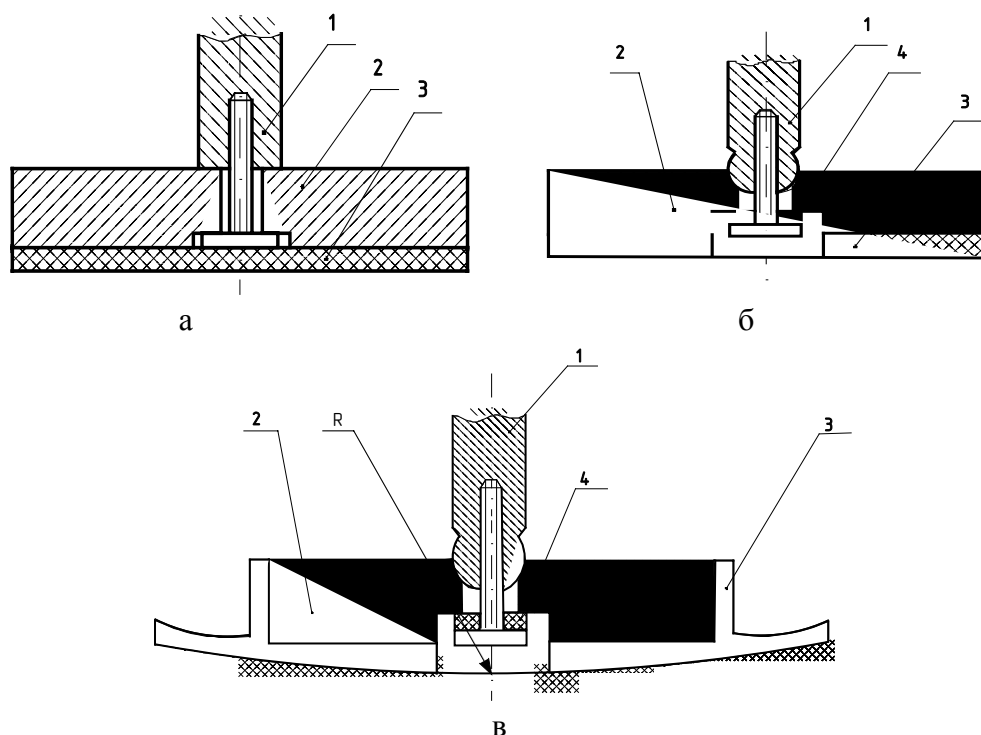
Экспериментально исследованы следующие варианты соединения ударника УСП с якорем 1 ЛЭМД:

- жесткое крепление ударника к якорю двигателя (рисунок 2.14 а);
- шарнирное крепление ударника к якорю двигателя, обеспечивающее необходимую пространственную ориентацию поверхностей ударника и бункера при соударении (рисунок 2.14 б).

Выявлено, что первый способ соединения ударника и якоря во многих случаях не эффективен и поэтому не может быть рекомендован к использованию. Неэффективная передача механической энергии ЛЭМД бункеру возникает в тех случаях, когда поверхность бункера, по которой производится удар, не является идеально ровной и не соблюдается условие абсолютной параллельности между плоскостями ударника и стенкой. В результате этого в ударнике возникают напряжения, приводящие к его изгибу и излому.

Для устранения этого недостатка предлагается шарнирное соединение ударника и якоря, обеспечивающее необходимую взаимную ориентацию якоря, ударника и поверхности бункера в момент удара (рисунок 2.14 б).

С целью повышения эффективности разгрузки сыпучего материала в тонкостенных емкостях, за счет равномерного распределения нагрузок на стенку емкости при ударе, накладка 3, жестко прикрепленная к ударнику, может быть выполнена криволинейной, например, с радиусом кривизны  $R$  (рисунок 2.14 в).



*1 – якорь ЛЭМД; 2 – ударник; 3 – накладка; 4 – резиновый буфер*

*Рисунок 2.14 – Формы ударников (а,б – прямая; в – криволинейная) и способы их крепления (а – жесткое; б,в – шарнирное) к якорю ЛЭМД*

Дополнительно регулирование энергии удара сводообрушителя в системе «сводобрушитель – бункер» может осуществляться с помощью регулируемого кронштейна за счет изменения расстояния между стенкой бункера и накладкой.

### **2.5.2 Устройство передачи механической энергии в системе «импульсный ЛЭМД – стержень»**

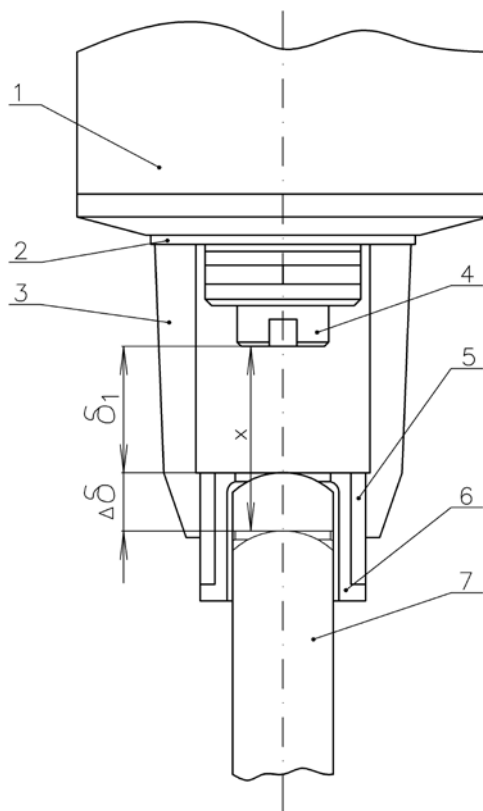
Важным этапом разработки и создания машин ударного действия с линейными электромагнитными двигателями представляется обоснование устройства передачи механической энергии двигателя (УПМЭ) забиваемому стержневому элементу. Очевидно, что конструкция и параметры именно этого устройства определяют, главным образом, эффективность передачи ударных импульсов, технические и эксплуатационные показатели импульсной машины с ЛЭМД.

Поскольку конструкции подобных устройств разнообразны и определяют характером и местом передачи энергии воздействия забиваемому стержню, представляется целесообразным рассмотреть конструкции УПМЭ на примерах ударных машин для торцевой и неторцевой забивки металлических стержней в грунт.

На рисунке 2.15 представлена конструкция УПМЭ, обеспечивающая торцевую передачу ударного воздействия стержню [50]. К основанию 2, установленному на ЛЭМД 1, с помощью ребер 3 крепится втулка 5. Расстояние между

бойком 4 и торцом втулки 5 неизменно, причем  $\delta_1 < \delta$ . Во втулку 5 ввернут наголовник 6, в который вставляется торец 7 забиваемого стержня. Конструкция наголовника обеспечивает непосредственное соударение бойка 4 ударной машины с торцом 7 погружаемого стержня, что снижает потери энергии при ударах.

Цилиндрические поверхности наголовника и втулки оснащены крупноходовой резьбой. Заворачивая или выворачивая наголовник из втулки, можно регулировать расстояние  $x$  между бойком 4 и торцом стержня 7. Максимальное смещение  $\Delta\delta$  наголовника относительно втулки выбрано так, что  $\Delta\delta + \delta_1 = x_{\max} = \delta$ , где  $\delta$  – ход якоря ЛЭМД ударной машины. Рациональное значение  $\Delta\delta$  для грунтов с различными свойствами не превышает 0,15-0,20 $\delta$ .

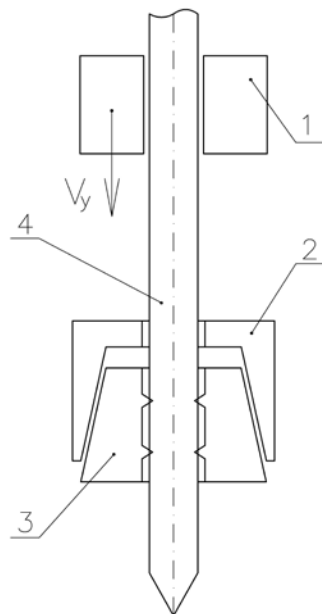


*Рисунок 2.15 – Узел согласования и передачи ударного воздействия в системе «ударная машина – стержень»*

Однако торцевой способ передачи ударных воздействий не позволяет погружать длинные продольно-неустойчивые стержневые элементы. В этом случае необходимо осуществлять передачу механической энергии двигателя стержню через его боковую поверхность. При неторцевой забивке в 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 кон-

структивной 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 [5; 7; 50; 65]. Конструктивная схема устройства приведена на рисунке 2.16.



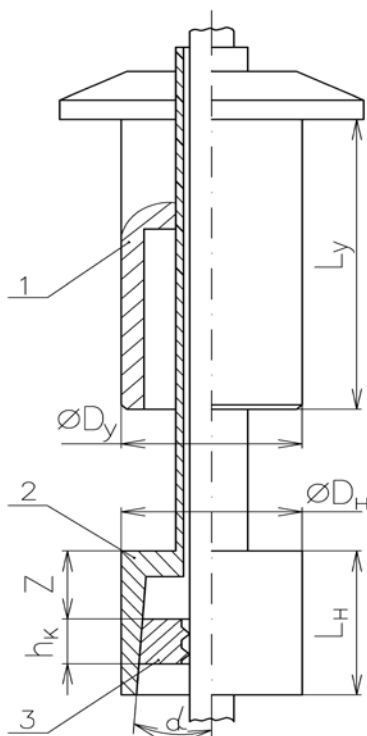
*1 – ударная масса; 2 – корпус зажимного приспособления; 3 – заклинивающие элементы; 4 – забиваемый стержень*

*Рисунок 2.16 – Зажимной механизм с самотормозящимся клиновым сопряжением*

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. 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 [7].

Ударная система (рисунок 2.17) характеризуется углом конусности наковальни клиновидного сопряжения и наружной поверхности заклинивающих элементов –  $\alpha$ ; 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 удар-

ника  $L_y$ ,  $D_y$ ; типом рабочей поверхности заклинивающих элементов, контактирующей с боковой поверхностью стержня.



1 – ударник, 2 – корпус зажимного приспособления,  
3 – заклинивающие элементы

Рисунок 2.17 – Основные элементы и параметры системы передачи ударных импульсов

Параметры клинового зажима удобно представить в виде геометрических критериев

$$\lambda_n = L_n / L_y; \quad \lambda_k = h_k / L_n; \quad \lambda_z = Z / L_n, \quad (2.21)$$

численные значения которых  $0 < \lambda < 1$ .

Для повышения эффективности передачи энергии удара следует стремиться к возможному увеличению параметров  $\lambda_n$  (0,6...0,85) и  $\lambda_z$  (0,4...0,7) и уменьшению параметра  $\lambda_k$  (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, исключающее 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, матери-

алом 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.

На рисунке 2.18 показана общая схема нагружения заклинивающего элемента с рассматриваемыми геометрическими характеристиками ( $\Theta$  – угол давления, образованный направлением нормальной силы  $N$ , действующей на клин, и вектором его скорости  $V$ ;  $\alpha$  – угол подъема клина;  $a$  – задняя грань;  $b$  – передняя грань).

С точки зрения обеспечения эффективности замыкания необходимо стремиться к максимальному внедрению рабочей кромки зажимного элемента в боковую поверхность стержня. В работах [5; 7; 50] рассмотрена методика определения параметров зажимного элемента клинового сопряжения и предлагается следующая последовательность построения геометрии зажимного клинового элемента (рисунок 2.18).

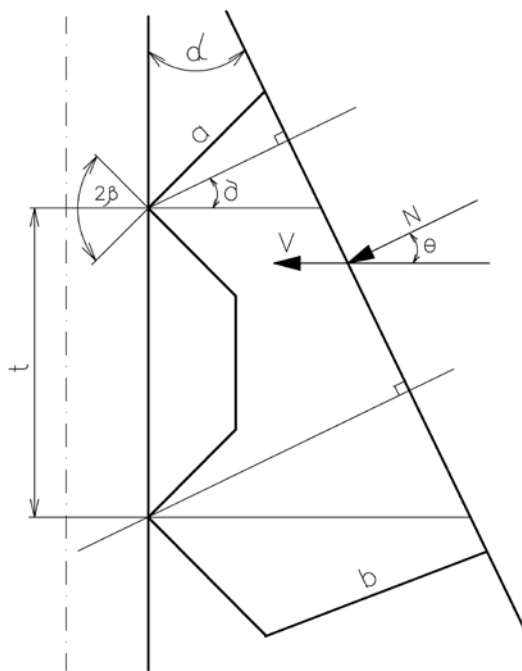


Рисунок 2.18 – Схема нагружения заклинивающего элемента

- 1 Прямыми линиями ограничивается поверхность зажимаемого стержня и клиновая поверхность. Угол подъема клина  $\alpha = \Theta$  принимается равным 15-18°.
- 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  $2\beta$ ) рабочей кромки. Так как предпочтительно иметь угол  $\delta$  между нормальными  $\delta = \alpha$ , то в зависимости от выбранного  $\alpha$  он составит  $\delta = 15-18^\circ$ .

3 От оси симметрии клина откладывается в обе стороны угол заострения рабочей кромки  $\beta$ , 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 косо-го 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:

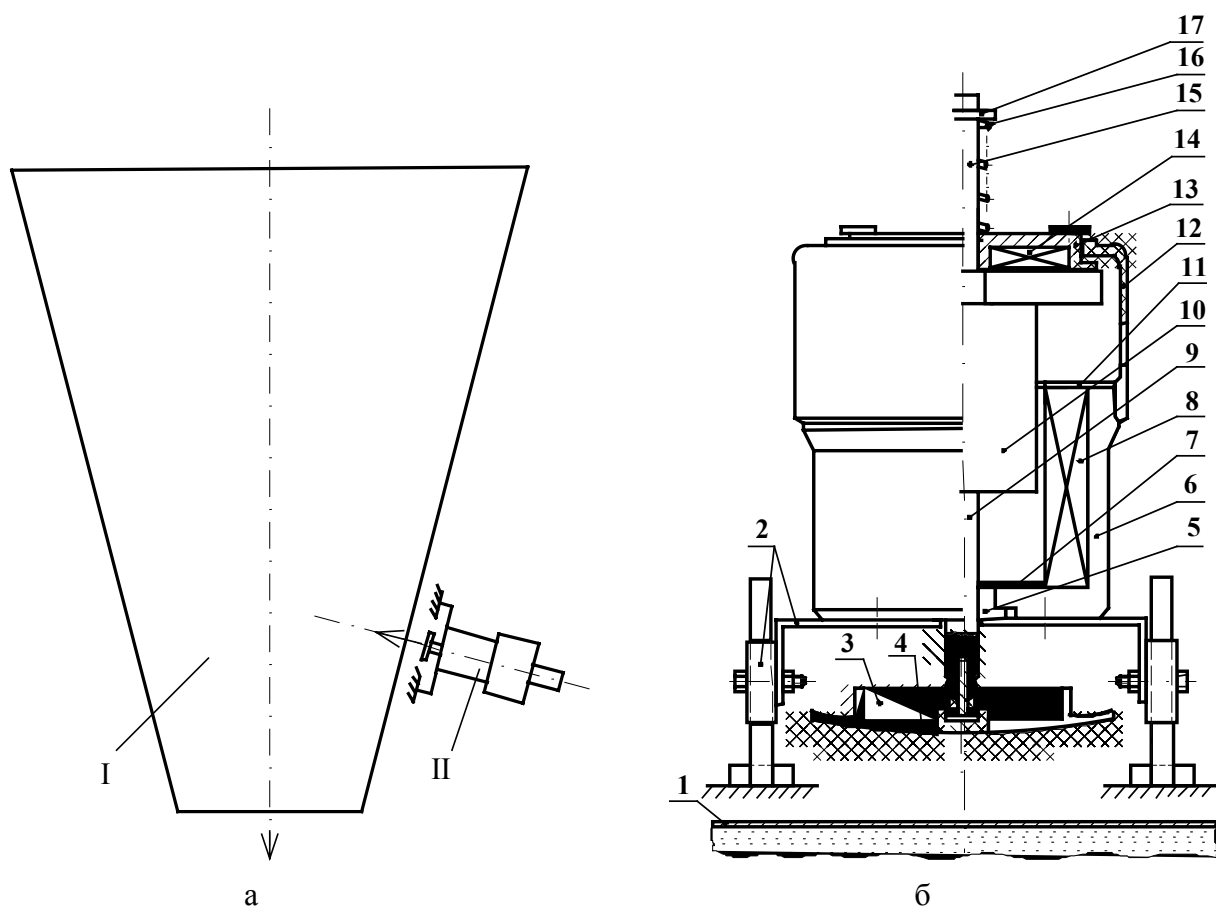
$$\alpha = \Theta = \delta = 15-18^\circ, \beta = 40-45^\circ.$$

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.

## **2.6 Редкоударная машина с импульсным ЛЭМД для сводообрушения в бункерах**

С учетом результатов исследований разработана, в частности, конструкция сводообрушителя, показанная на рисунке 2.19.

В магнитопровод 6 установлена цилиндрическая многослойная обмотка 8. Фиксация обмотки от возможных перемещений обеспечивается шайбой из немагнитного материала 11. Якорь 10 комбинированной формы имеет нижний 9 и верхний 15 направляющие стержни. На торце нижнего стержня установлено устройство согласования и передачи, включающее ударник 3 с жестко прикрепленной к нему накладкой 4. В верхней части корпуса 12 размещена возвратная пружина 16, которая поджимается гайкой 17. Резиновый буфер 7 служит для смягчения ударов.



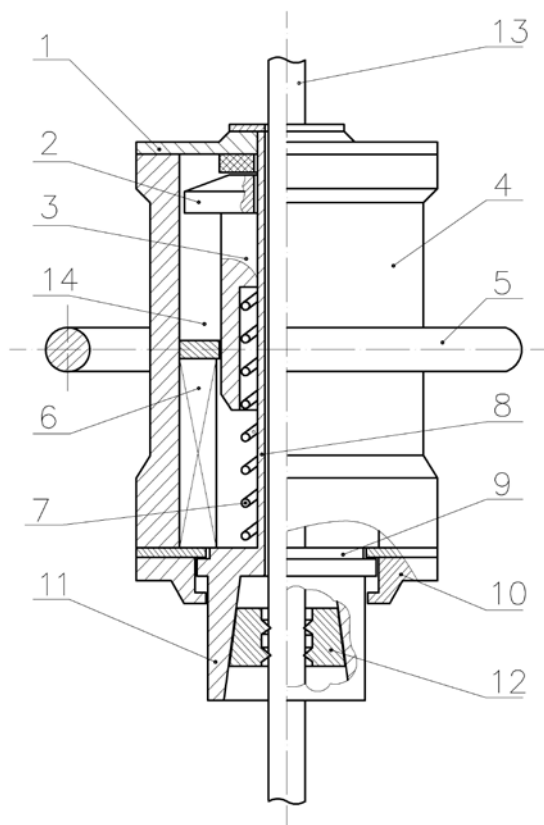
*I – бункер; II – сводообрушитель с ЛЭМД; 1 – стенка бункера; 2 – кронштейн; 3 – ударник; 4 – накладка; 5, – втулка; 6 – магнитопровод; 7, – буфер; 8 – обмотка ЛЭМД; 9, 15 – нижний и верхний направляющие стержни; 10 – якорь; 11 – шайба; 12 – направляющий корпус; 13 – магнитопровод; 14 – обмотка электромагнита; 16 – пружина; 17 – гайка*

*Рисунок 2.19 – Схема установки и взаимного пространственного положения бункера и сводообрушителя (а); конструкция сводообрушителя с ЛЭМД (б)*

Повышение выходных энергетических показателей предлагаемых сводообрушителей с ЛЭМД обеспечивается либо за счет увеличения хода якоря двигателя до  $\delta = 1,5r_l$  и интенсификации энергопреобразовательных процессов в ЛЭМД по электрическому каналу, либо без увеличения  $\delta$  за счет интенсификации режима аккумуляирования магнитной энергии в индуктивностях машины на этапе трогания при неподвижном якоре. В последнем случае двигатель сводообрушителя оснащается устройством удержания якоря, которое состоит из удерживающего электромагнита с броневым магнитопроводом 13 и кольцевой полостью, в которой размещена обмотка 14. Крепление сводообрушителя осуществляется с помощью регулируемого кронштейна, обеспечивающего при необходимости изменение начального взаимного расположения ЛЭМД и бункера.

## 2.7 Переносная электромагнитная ударная машина (УМ) для погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт

Проведенные исследования позволили создать ударную машину с ЛЭМД для погружения длинных, продольно-неустойчивых стержневых элементов в грунт (рисунок 2.20).



*Рисунок 2.20 – Электромагнитная машина ударного действия для погружения стержневых элементов в грунт*

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 накопительной 9 и корпусом 11 зажимного приспособления для соединения ударной машины со стержнем 13 с помощью заклинивающих элементов 12.

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 удерживают 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.

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 ударного воздействия и улучшает вибрационно-силовые характеристики машины.

Таким образом, регулярно переставляя электромагнитную ударную машину по длинному забиваемому стержню 13, обеспечивают его погружение в грунт.

### 3 ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УДАРНЫХ МАШИН С ЛЭМД

#### 3.1 Краткий сравнительный анализ источников электропитания ударных машин с ЛЭМД

Ударная машина, содержащая в основе линейный электромагнитный двигатель, осуществляет импульсное преобразование электрической энергии непосредственно в механическую работу. При этом технико-экономические показатели в значительной мере определяются способностью источника питания обеспечить большую мгновенную мощность питающих импульсов в обмотке ЛЭМД. Увеличение длительности питающих импульсов выше минимально необходимых приводит к резкому снижению КПД, производительности, увеличению потребляемой мощности машины.

Для электропитания электромагнитной ударной машины на оборудованных площадках и объектах используют стационарную электрическую сеть переменного тока общего назначения.

Из уравнения баланса мощностей, приведенного к виду

$$ui = i^2 R + Li(di/dt) + i^2 V(dL/d\delta), \quad (3.1)$$

где  $u$ ,  $i$ ,  $R$  – напряжение, ток, активное сопротивление обмотки;  $L$  – индуктивность;  $\delta$ ,  $V$  – перемещение и скорость якоря, следует, что скорость изменения энергии в обмотке двигателя определяет эффективность энергопреобразования и на этапе  $t_{TP}$  трогания (второе слагаемое), и на этапе  $t_{ДВ}$  движения (второе и третье слагаемое) якоря. Для повышения эффективности следует обеспечить согласованное с динамическими процессами в импульсном ЛЭМД и значение тока  $i(t)$ , и скорости  $di/dt$  его изменения на интервале  $t_{TP}$ , а на этапе движения – возможное постоянство значений  $i(t)$ , при прочих равных условиях ( $R$ ,  $L$ ). Для выполнения этих условий источник питания должен реализовывать в импульсном ЛЭМД циклы с различной интенсивностью превращения магнитной энергии в механическую и восстановления магнитной энергии из электрической.

Импульсы выпрямленного напряжения сети переменного тока, используемые обычно для питания ЛЭМД [66-69], не в полной мере соответствуют этим требованиям, в частности, при однофазном однополупериодном питании. Это способствует снижению достижимых силовых и энергетических показателей машин с ЛЭМД. В этом случае их улучшение достигается, например, искусственным увеличением интервала  $t_{TP}$  за счет управления двигателем дополнительно по механическому каналу с помощью удержания якоря [19].

При эксплуатации УМ в местах без стационарной электросети, например, при использовании ее в полевых условиях, применяют автономные источники

электроэнергии. В настоящее время для электропитания автономных устройств обычно используются дизель- или бензоагрегаты и химические источники тока – гальванические элементы или аккумуляторы (АКБ), реже – топливные элементы [50]. Наилучшие удельные показатели первичных источников достигают значений, например, по удельной энергии  $W/G$ , Дж/кг:  $36 \cdot 10^3$  – для радиоизотопных батарей; 650 – для бензоагрегатов; 540 – для топливных элементов, 255...94 – для серебряно-цинковых и свинцовых аккумуляторов. Однако в любом первичном автономном источнике энергозапас  $W$ , кДж, и мощность  $P$ , кВт, остаются ограниченными и зачастую соизмеримыми с мощностью потребителя.

Ударные машины, содержащие в основе ЛЭМД, осуществляют дискретное потребление энергии от источника питания, для которого представляют импульсную нагрузку с длительностью импульса 0,05...0,5 с, амплитудным значением тока  $(0,05...0,5) \cdot 10^3$  А и мгновенной мощностью в десятки киловатт. Очевидно, что свойства АИП в значительной мере определяют выходные показатели и ЛЭМД, и импульсного комплекса в целом.

Автономные источники электропитания ударной машины для погружения электродов в грунт должны соответствовать следующим требованиям:

- малые габариты и масса, компактность; возможность ручной доставки к месту работы;
- малое внутреннее сопротивление;
- возможность работы в импульсном режиме; высокая мощность импульсов;
- постоянная готовность к работе;
- обеспечение заданной минимальной продолжительности работы УМ;
- работа в широком диапазоне параметров окружающей среды;
- удобство размещения на транспортном средстве.

Сравнительный анализ показывает, что из всего многообразия используемых в настоящее время в различных отраслях науки и техники автономных источников электроэнергии в наибольшей степени сформулированным требованиям отвечают мобильные установки с электромашинными преобразователями энергии (ЭМУ) и химические источники тока (ХИТ), осуществляющие преобразование химической энергии в электрическую и характеризующиеся независимостью от посторонних источников тепла или излучения [50; 70-73]. Рассмотрим их подробнее и по результатам сравнительного анализа определим целесообразность использования ЭМУ и ХИТ для энергообеспечения автономных ударных машин.

ЭМУ состоит из двигателя внутреннего сгорания, генератора, устройств управления и защиты, объединенных конструктивно и обеспечивающих надежную, длительную работу в заданных условиях. Такие устройства рассчитаны на продолжительную работу при равномерной нагрузке; предварительная подго-

товка к запуску зависит от температуры окружающей среды; габаритные размеры и масса агрегатов мощностью более 10 кВт значительны и требуют для транспортировки специального прицепа, что затрудняет их использование в переносном приводе.

Для сопоставления рассматриваемых автономных энергоустановок с ЭМУ и ХИТ удобно воспользоваться значениями их КПД  $\eta$ . Проведенные сравнения [50] показывают, что значения  $\eta$  у ХИТ достигают 60-80 %, тогда как лучшие варианты тепловых машин имеют общий КПД до 45%.

Сравнение электрических и других показателей автономных источников питания удобнее всего сделать, используя удельные показатели, среди которых наиболее характерными являются показатели удельной энергии и удельной мощности, представленные для сравниваемых ЭМУ и ХИТ на гистограмме (рисунок 3.1).

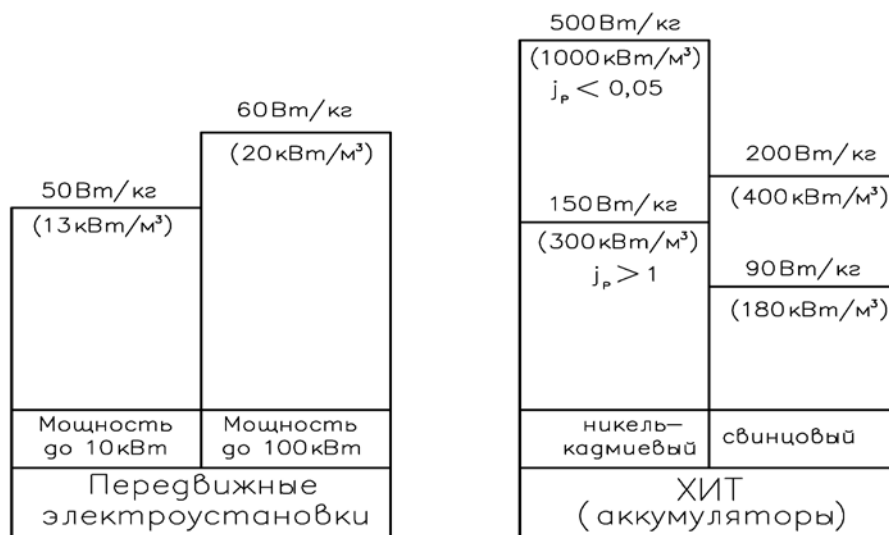


Рисунок 3.1 – Удельные показатели автономных источников питания с электроустановками и ХИТ

При определении численных значений характеристик для электроустановок предполагается продолжительный режим работы с номинальной нагрузкой генератора. Из многочисленного класса ХИТ для сравнения приняты аккумуляторы наиболее распространенных никель-кадмиевой и свинцовой электрохимических систем. Поскольку удельные показатели ХИТ в значительной степени зависят от условий разряда [50; 70; 73], на диаграмме представлены показатели для длительного  $j_p < 0,05$  и форсированного  $j_p = 1$  режимов работы ХИТ. Из диаграммы следует, что удельные характеристики ХИТ в зависимости от условий разряда превышают показатели ЭМУ в 1,5...50 раз. Это свидетельствует о предпочтительности использования ХИТ для автономного энергообеспечения электромагнитных ударных машин.

При выполнении технических задач ХИТ обычно оцениваются по следующим параметрам:

- напряжение разомкнутой цепи. Если величина напряжения недостаточна, то проводится оценка количества последовательно включенных элементов в батарею, необходимого для получения требуемого напряжения;
- удельная емкость в ампер-часах на единицу веса или объема ХИТ, определяющая запас электрической энергии;
- удельная мощность, то есть произведение силы тока на напряжение, отнесенное к единице веса или объема ХИТ;
- срок годности;
- величина саморазряда, обусловленного наличием побочных электрохимических процессов на электродах, приводящих к расходованию активных масс (коррозия) и потере удельной емкости ХИТ;
- стоимость.

Чем выше первые четыре характеристики и ниже пятая и шестая, тем более универсальное применение у данного химического источника тока.

По принципам работы ХИТ разделяют на три группы: первичные, вторичные и топливные элементы (рисунок 3.2).

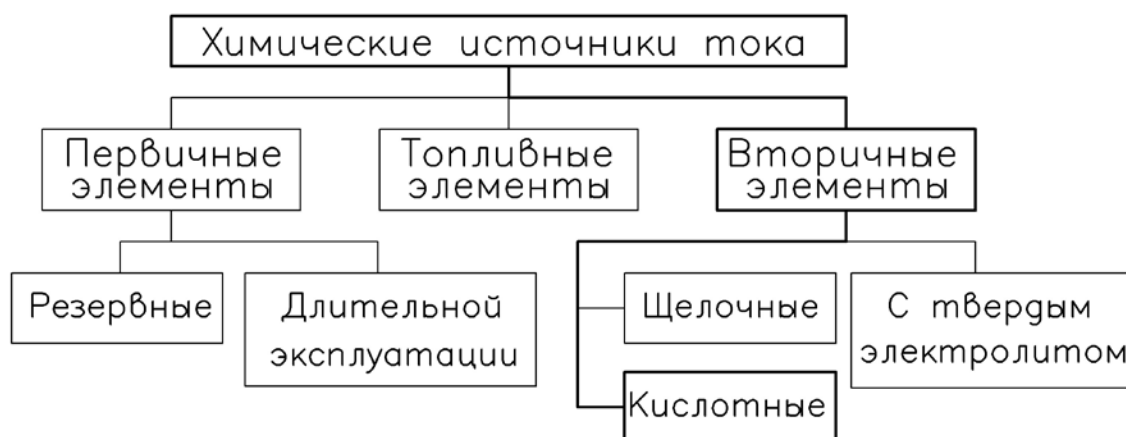
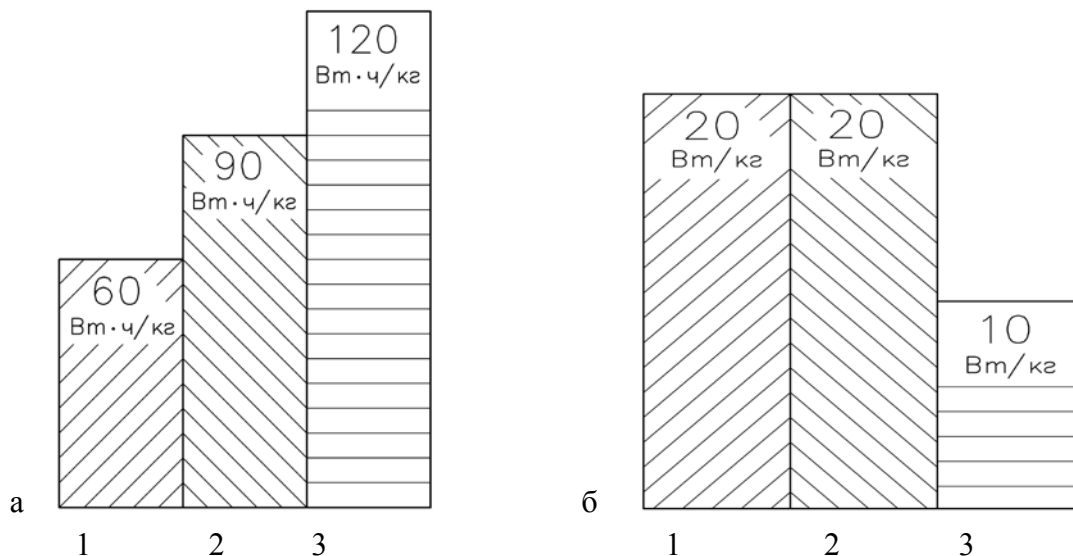


Рисунок 3.2 – Схема классификации ХИТ

Первичные ХИТ (гальванические элементы) содержат активные вещества на электродах, а после их полного расходования источники прекращают свою работу и требуют замены на новые. Назначение резервных элементов состоит в том, чтобы в определенный момент включаться для выполнения поставленной задачи. Обычно период ожидания имеет длительный срок, поэтому необходимо избежать контакта электродов с электролитом, чтобы не допускать коррозионных процессов. Для этого электролит хранят в отдельной ампуле, которую разбивают в момент включения ХИТ в электрическую цепь. Если в качестве электролита используют расплавленную соль, то в твердом состоянии она не дает

возможности развиваться коррозионным процессам в контакте с электродами. Введение в действие элемента производится быстрым его разогреванием, когда соль плавится и начинает выполнять функции электролита. Такие ХИТ называют разогревными (тепловыми).

В гальванических элементах (ГИ) длительной эксплуатации главное внимание уделяется снижению внутреннего сопротивления и предотвращению паразитных электрохимических процессов активных масс, приводящих к саморазряду элемента. Для сравнения удельных характеристик гальванических элементов на рисунке 3.3 приведена гистограмма.

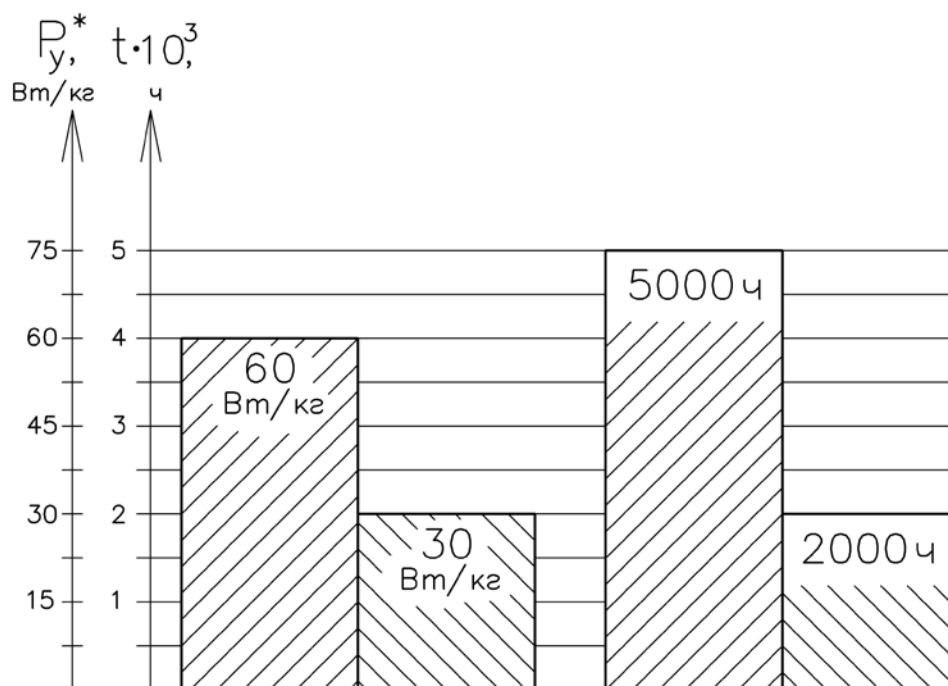


1 – марганцевые солевые, 2 – марганцевые щелочные; 3 – ртутно-цинковые

Рисунок 3.3 – Удельная энергия  $W_y^*$  (а) и максимальная мощность  $P_y^*$  (б) гальванических элементов

Топливные элементы (ТЭ) также относятся к первичным элементам, но конструктивно выполняются так, что активные вещества подаются, а продукты реакции отводятся во время работы элемента. Для своей работы топливные элементы нуждаются в различных вспомогательных системах, обеспечивающих подготовку и подвод реагентов, отвод продуктов реакции, поддержание теплового режима, хранение активных веществ. Ввиду этих особенностей применение ТЭ в качестве источника питания электромагнитной ударной машины представляется нецелесообразным.

Сравнительные гистограммы основных показателей топливных элементов представлены на рисунке 3.4 [50; 70; 71].



1 – водородно-кислородные, 2 – гидразино-кислородные

Рисунок 3.4 – Удельная мощность  $P_y^*$  и ресурс работы  $t$  топливных элементов

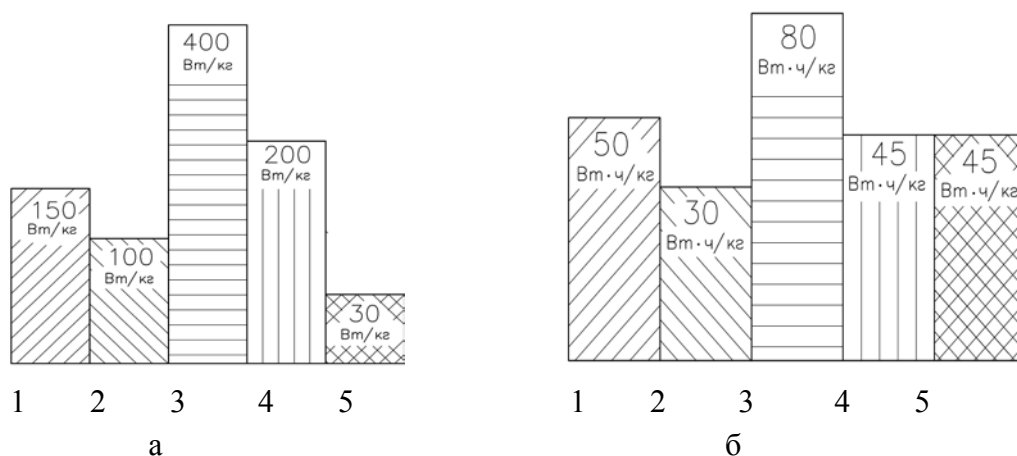
Вторичные ХИТ (аккумуляторы) после расходования активных масс (разряда) могут быть приведены в рабочее состояние пропусканием электрического тока через элемент в обратном направлении. В качестве примера кислотного аккумулятора можно привести свинцовый аккумулятор (СА), активными веществами которого являются свинец и двуокись свинца, а электролитом – раствор серной кислоты. СА – наиболее распространенный в настоящее время вторичный ХИТ. На основе свинцовых аккумуляторов выпускаются стартерные (для запуска двигателей внутреннего сгорания), тяговые (для питания электромоторов передвижных средств) и стационарные батареи (для радиоэлектронных устройств и средств связи, а также для работы в аварийных ситуациях).

В последнее время интенсивно ведутся исследования по замене одного из электродов на органические окислительно-восстановительные системы. Эти работы одновременно преследуют цель снижения веса аккумулятора. Однако успехи в этой области еще достаточно скромные [50; 73].

К щелочным аккумуляторам, выпускаемым промышленностью в настоящее время, относятся железно-никелевые, кадмий-никелевые и цинк-серебряные, для которых в качестве электролита используется водный раствор калиевой щелочи. Эти аккумуляторы просты в эксплуатации и имеют более высокие удельные электрические характеристики по сравнению со свинцовыми аналогами. Однако стоимость их более высокая. Это особенно относится к цинк-серебряным аккумуляторам, которые в качестве окислителя используют окись серебра. Его удельные электрические характеристики в 2 раза выше, чем у других щелочных

аккумуляторов, что обеспечивает их широкое применение в авиационной и космической технике. Окислительным электродом железо-никелевого и кадмий-никелевого аккумуляторов является оксид (гидроксид) никеля. В настоящее время технология его изготовления хорошо отработана, что обеспечивает надежную работу в течение тысяч циклов. Это обстоятельство послужило основой для создания некоторых типов комбинированных аккумуляторов, где в качестве отрицательного электрода используют металлический цинк или водород. В последнем случае для проведения электрохимической реакции с водородом применяют активированный платиной пористый никелевый электрод. Для накопления значительных количеств водорода в аккумуляторе создается высокое давление, которое должен выдерживать его корпус. С недавнего времени для снижения давления стали использовать интерметаллические соединения никеля с редкоземельными элементами. Они способны поглощать большие количества водорода при сравнительно небольших давлениях, а при разряде аккумулятора легко выделяют водород. Однако ввиду высокой стоимости аккумуляторы данной группы не получили широкого распространения в силовой импульсной технике.

На рисунке 3.5 представлена сравнительная гистограмма удельных характеристик аккумуляторных источников питания [50; 73].



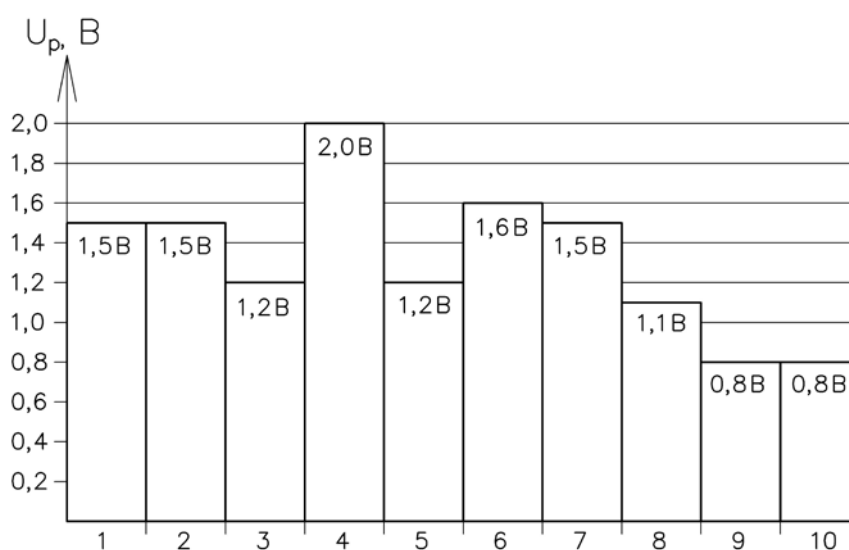
1 – свинцовые кислотные, 2 – кадмиево- и железо-никелевые щелочные;  
 3 – серебряно-цинковые; 4 – никель-цинковые; 5 – никель-водородные  
 Рисунок 3.5 – Удельные энергия  $W_y^*$  (а) и максимальная мощность  $P_y^*$  (б)  
 аккумуляторных источников питания

Примером аккумулятора с твердым электролитом служит серно-натриевая система. В качестве твердого электролита в нем используется высокопрочная керамика из полиалюминатов натрия. Повышенная рабочая температура (250-300 °С) вторичного источника тока в данном случае необходима, так как активные массы металлического натрия и серы должны находиться в расплавленном состоянии, чтобы осуществлять электродные реакции с большой скоростью. Высокая ЭДС данной пары и низкая их молекулярная масса обеспечивают высокие элек-

трические характеристики рассматриваемого аккумулятора. Однако низкий ресурс циклической работы таких источников питания ограничивает их применение в импульсных электромагнитных приводах.

Одной из важных характеристик для всех ХИТ, оказывающей влияние на выбор источника питания импульсной ударной электромагнитной машины с ЛЭМД, является разрядное напряжение  $U_p$  (рисунок 3.6), которое для серийно выпускаемых гальванических элементов не превышает 1,5 В, тогда как для свинцовых аккумуляторов значение  $U_p$  достигает 2,0 В. Наименьшим разрядным напряжением  $U_p$  обладают топливные элементы.

Сопоставительный анализ ХИТ показывает, что для питания импульсной ударной электромагнитной машины с ЛЭМД целесообразно использовать вторичные элементы – аккумуляторы, в частности, свинцовый кислотный, в силу следующих преимуществ: широкое распространение, доступность, низкая стоимость; хорошие электрические показатели – малое внутреннее сопротивление, высокие удельные емкость, мощность, энергия; большая отдача по емкости и энергии; приемлемый ресурс и срок службы; простота обслуживания в эксплуатации.



1 – марганцевые солевые, 2 – марганцевые щелочные; 3 – ртутно-цинковые;  
 4 – свинцовые кислотные, 5 – кадмиево- и железо-никелевые щелочные;  
 6 – серебряно-цинковые; 7 – никель-цинковые; 8 – никель-водородные;  
 9 – водородно-кислородные, 10 – гидразино-кислородные

Рисунок 3.6 – Разрядное напряжение  $U_p$  ХИТ

Отметим основные достоинства, присущие аккумуляторному источнику питания (АИП), в сравнении с другими автономными источниками:

- отсутствие вращающихся узлов, механических передач, кинематических связей с приводным двигателем; бесшумность работы;

- возможность получения мощных питающих электрических импульсов, что обеспечивает требуемые энергетические показатели машин ударного действия;
- мгновенная готовность к работе;
- наибольший удельный запас электроэнергии;
- возможность удобного размещения на транспортном средстве;
- возможность обеспечения безопасного для обслуживающего персонала уровня напряжения.

Однако разрядная емкость  $C_p$  аккумуляторного источника питания неоднозначна и существенно зависит от условий среды и электрического разряда батарей, определяемого значением нормированного тока  $j_p$ . Чем меньше значение  $j_p$  при разряде аккумуляторов, тем значительнее емкость  $C_p$ , тем большую часть запасаемой энергии АИП отдаст в нагрузку. Добиться этого позволяет применение промежуточных накопителей энергии.

В частности, хорошими удельными показателями при запасаемой энергии  $W \leq 10^4$  Дж обладают емкостные накопители. Энергией конденсаторов, определяемой емкостью  $C$  и напряжением  $U$ , легко управлять и на этапе заряда, и на этапе вывода энергии в ЛЭМД [74; 75].

Для накопителей ударных электромагнитных машин, питаемых однополярными импульсами, представляется перспективным применение электролитических конденсаторов, обладающих значительной удельной (50...60 Дж/г) и запасаемой (>100 кДж) энергией, минимальным внутренним сопротивлением  $((2...9) \times 10^{-3}$  Ом), не зависящим от условий среды и разряда, которые способны отдавать при разряде любую, определяемую лишь параметрами нагрузки, мощность и одновременно существенно облегчить электрический режим АИП.

Особенности энергопреобразования в ЛЭМД УМ, питаемой от аккумуляторной батареи и от емкостных накопителей энергии, подробно рассмотрены в главе 5.

### **3.2 Основные типы электрических преобразователей для питания и управления ударных машин с ЛЭМД**

Линейные электромагнитные двигатели, осуществляющие дискретное потребление и преобразование электрической энергии в механическую работу, для источника питания представляют собой нагрузку импульсного характера. Формирование в обмотке ЛЭМД униполярных импульсов напряжения и тока необходимой амплитуды, формы, длительности и частоты осуществляется с помощью специальных электрических преобразователей (ЭП). В работах [19; 24; 35; 50; 69] показано, что устройство ЭП оказывает решающее влияние на энергию

удара, КПД и надежность машины. Параметры источника питания и габариты (мощность) ЛЭМД определяют, главным образом, схему и конструкцию импульсного преобразователя.

Для выработки рекомендаций по улучшению существующих или разработке новых схем ЭП, реализующих необходимые алгоритмы управления и режимы энергопреобразования ЛЭМД ударных машин, представляется целесообразным сформулировать требования к электрическим преобразователям для этих ЛЭМД и рассмотреть основные классификационные признаки ЭП и схемотехнические особенности их характерных функциональных узлов.

Выходные параметры электромагнитной ударной машины (механическая энергия, частота ударов, КПД) в значительной степени зависят от схемотехнических решений импульсных электрических преобразователей. Сформулируем требования к ЭП [19; 24; 35; 50]:

- простота, надежность, незначительные капитальные затраты;
- стабильность выходных параметров привода;
- возможность регулирования выходных параметров УМ;
- гашение магнитного поля обмотки ЛЭМД или рекуперация его энергии в конце цикла энергопреобразования;
- минимизация колебаний напряжения в электрической сети, обусловленных импульсным характером работы привода, и соответствие их допустимым нормам;
- автоматическое отключение привода от источника в случае его повреждения.

Наиболее полно классификация импульсных электрических преобразователей ЛЭМД ударных машин рассмотрена в работах [24; 50]. Из всего многообразия импульсных электрических преобразователей интерес с точки зрения совершенствования существующих или разработки новых для ЛЭМД ударной машины представляют устройства, обеспечивающие:

- возможность формирования алгоритмов управления, повышающих выходные показатели за счет интенсивности энергопреобразовательных процессов в ЛЭМД;
- возможность регулирования и стабилизации выходной механической энергии УМ;
- наличие в ИЭП промежуточных накопителей энергии.

На рисунке 3.7 представлена классификация импульсных электрических преобразователей. Основными классификационными признаками для них являются параметры источника питания, способы гашения магнитного поля, способы управления движением якоря ЛЭМД, наличие промежуточных накопителей энергии.

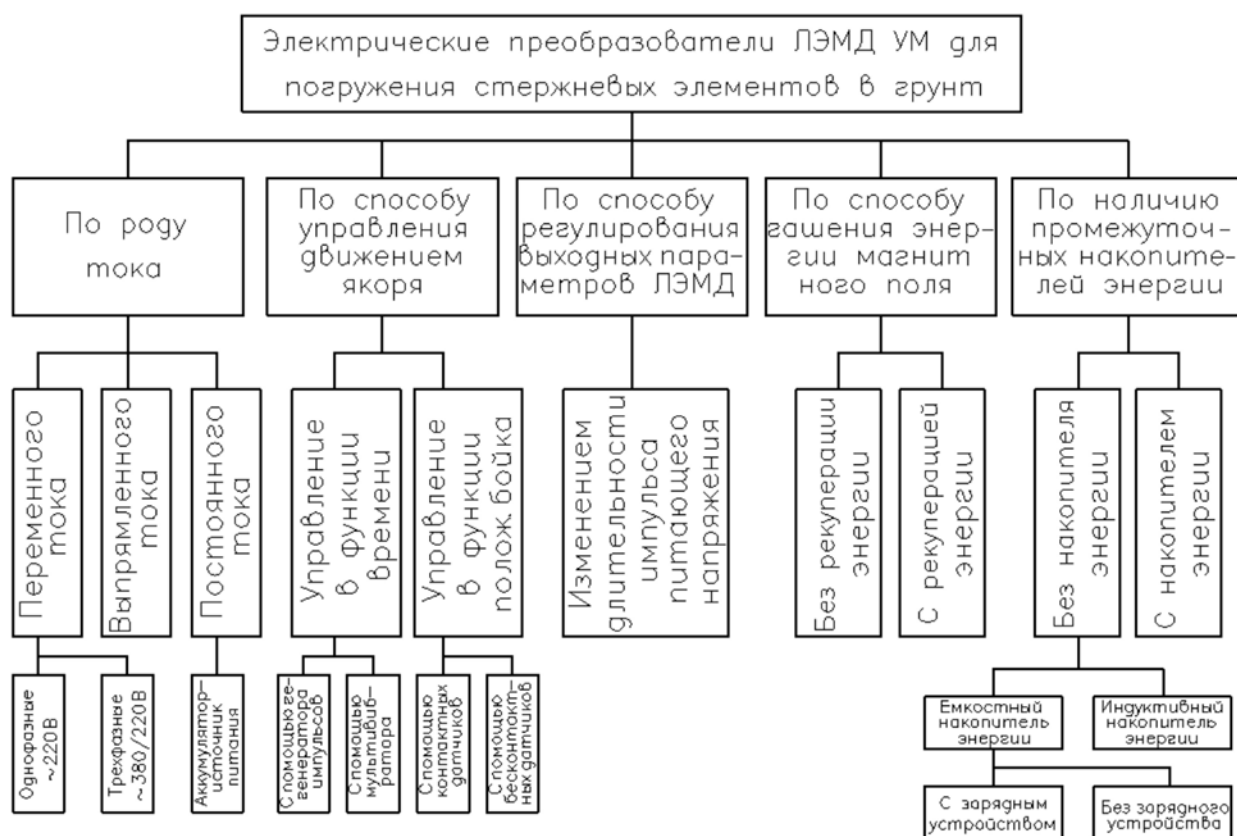


Рисунок 3.7 – Классификация импульсных электрических преобразователей ЛЭМД УМ

Схема и конструкция ИЭП в значительной мере определяются параметрами источника питания. Большинство разработанных преобразователей [19; 24; 35; 50; 69] предназначены для подключения к сети переменного тока стандартного напряжения (220-380 В) и промышленной частоты (50 Гц); при этом для электрических преобразователей ЛЭМД средней и большой мощности целесообразно использовать трехфазную сеть, для ЛЭМД малой мощности – однофазную. При отсутствии сети переменного тока, питание электромагнитной ударной машины осуществляется от автономного источника через ИЭП, подключаемый к постоянному источнику тока.

В зависимости от типа применяемых в силовой части преобразователя коммутационных элементов (КЭ), различают ИЭП на полностью управляемых вентилях – тиристорах или транзисторах [19; 24; 50].

По способу управления движением бойка ЛЭМД электрические преобразователи подразделяются на управляющие в функции времени и в функции положения якоря. Управление в функции времени осуществляется от генераторов импульсов, которые формируют управляющие импульсы логического уровня. Управление в функции положения якоря-бойка предполагает наличие контактных или бесконтактных датчиков, устанавливаемых непосредственно на ЛЭМД.

В заключение представляется целесообразным кратко рассмотреть схемотехнические особенности характерных функциональных блоков известных электрических преобразователей машин с ЛЭМД [19; 24; 35; 50] с учетом признаков, показанных на диаграмме (рисунок 3.7).

Основным узлом электрического преобразователя, подключаемого к источнику переменного тока, является однополупериодный управляемый тиристорный выпрямитель, который осуществляет управление движением якоря ЛЭМД в функции времени, перемещения якоря либо тока двигателя. Наибольшее распространение в машинах ударного действия с ЛЭМД получили ЭП, управляющие движением якоря в функции времени. ЭП с таким способом управления отличаются относительно простым схемным решением и надежностью в работе [24].

Регулирование выходных параметров ЛЭМД в большинстве разработанных ЭП осуществляют изменением длительности питающего импульса напряжения. Для технологии, например, разрушения сводов сыпучего материала с различной влажностью диапазон регулирования основного выходного параметра сводообрушителя – энергии удара  $A_y$ , обеспечиваемый этим способом, является вполне приемлемым. Для обеспечения заданной длительности питающих импульсов ЭП содержит устройство формирования выдержек времени с помощью предварительно заряженного конденсатора, подключаемого через резисторы к управляющим электродам силовых тириستоров. Упрощенная схема устройства формирования выдержки времени для однофазного управляемого выпрямителя сводообрушителя приведена на рисунке 3.8 [24].

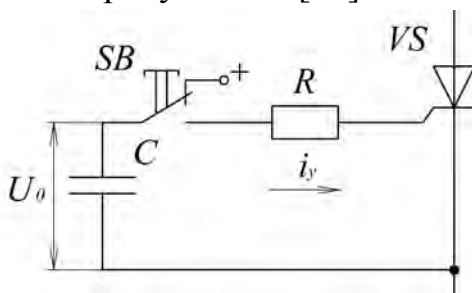


Рисунок 3.8 – Схема устройства формирования выдержки времени

Длительность питающего импульса  $\Delta t$  определяется по формуле

$$\Delta t = RC \ln \left( \frac{U_0}{RI_y^{min}} \right), \quad (3.2)$$

где  $R$  – сопротивление;  $C$  – емкость;  $U_0$  – начальное значение напряжения на конденсаторе;  $I_y^{min}$  – минимальное значение тока управления, при котором тиристоры преобразователя находятся в открытом состоянии.

Дифференцированием по  $R$  определяется значение  $R_0$ , соответствующее максимальной выдержке времени при данной емкости конденсатора, а также необходимая емкость этого конденсатора:

$$R_0 = \frac{U_0}{e I_y^{\min}}; C = e \Delta t_m I_y^{\min}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta t_m$  – наибольшая требуемая длительность импульса;  $e$  – основание натурального логарифма.

Регулирование длительности импульса производится либо изменением сопротивления  $R$ , либо изменением емкости конденсатора  $C$ , поскольку регулирование изменением напряжения  $U_0$  сложно и связано с дополнительными потерями энергии. Для стабилизации энергии единичного удара ЛЭМД ЭП оснащен блоком синхронизации начала формируемого им импульса питающего напряжения с напряжением сети по фазе.

В работе [19] установлено, что эффективность сводообрушителей непосредственно связана с повышением значения ударной силы  $F_y$ , возникающей при импульсном взаимодействии ЛЭМД и рабочего органа (РО) со средой. Повышение среднего значения этой силы необходимо добиваться не только увеличением массы  $m_l$  ударника и его предударной скорости  $V_{уд}$ , но и уменьшением времени взаимодействия элементов. Для этого после совершения рабочего хода ЛЭМД его магнитное поле необходимо погасить, чтобы мог осуществиться обратный ход. Поэтому ЭП должен иметь устройство гашения магнитного поля (УГ). Условия гашения магнитного поля и запираания тиристоров существенно зависят от схемы выпрямления. Например, при однофазной однополупериодной схеме выпрямления, применяемой в ЭП ЛЭМД с энергией удара 25...35 Дж и длительностью рабочего хода до  $10^{-2}$  с, имеются идеальные условия для гашения поля и запираания тиристора и поэтому нет необходимости в каком-либо УГ. При трехфазной однополупериодной схеме выпрямления, применяемой для с ЛЭМД на 35...50 Дж, обладающих большей индуктивностью, процесс гашения поля затягивается. Это связано с тем, что за время одного отрицательного полупериода магнитное поле не успевает свернуться и в течение следующего положительного полупериода ток снова возрастает, что приводит к увеличению потерь в якоре ЛЭМД из-за переменной составляющей магнитного потока и его «залипанию». Поэтому необходимо применять меры для ускорения гашения поля.

В работе [24] установлено, что условием возможности работы ЛЭМД без УГ является полное гашение поля и запираание тиристора в течение первого отрицательного полупериода, то есть за время  $t_f \leq 0,01$  с при частоте сети 50 Гц. Для ЛЭМД с трехфазной однополупериодной схемой выпрямления наиболее простым устройством гашения магнитного поля, обладающим высокой надежностью,

большим сроком эксплуатации, малыми габаритами и массой, является резистор с обратным диодом, включенным параллельно обмотке.

Величина гасящего резистора определяется по выражению

$$R = U_m / I_0, \quad (3.4)$$

где  $I_0$  – величина тока ЛЭМД в момент окончания рабочего хода.

Проведенный краткий сравнительный анализ особенностей известных ЭП для управления ударными машинами с ЛЭМД позволяет сформулировать рекомендации по улучшению характеристик узлов схем существующих ЭП и разработать новые преобразователи, позволяющие повысить эффективность рабочего процесса ударных машин с ЛЭМД.

### **3.2.1 Импульсные электрические преобразователи, подключаемые к источникам переменного тока**

При питании ЛЭМД ударных машин от стационарной сети или автономных источников питания, например, передвижных электростанций или бензоагрегатов, представляется важным рассмотреть электрические преобразователи, используемые с источниками переменного тока.

Схемы импульсных электрических преобразователей, предназначенных для подключения к сети переменного тока, рассмотрены в работах [19; 24; 35; 50; 69]. Наибольший интерес к использованию для управления электромагнитной ударной машиной представляет ЭП, содержащий в основе трехфазный однополупериодный выпрямитель с анодной группой силовых тиристоров и оптронной развязкой формирователя управляющих сигналов (рисунок 3.9). 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 преобразователем осуществляется кнопкой  $SB1$ .

Для совершения ударов бойка-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 импульсного электрического преобразователя осуществляется следующим образом. При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание формирователь импульсов ФИ. На выходе микросхемы  $DD1$  будет логический 0, транзистор  $VT1$  останется закрытым, поэтому светодиод тиристорного оптрона  $U1$  через стабилитрон  $VD1$  окажется под напряжением. Излучение светодиода оптрона  $U1$  приводит к засвечиванию и отпиранию фототиристора оптрона  $U1$ , протеканию тока

через один из управляющих электродов тиристоров  $VS1 - VS3$ . В результате по обмотке  $LM$  протекает ток, вызывая срабатывание ЛЭМД ударной машины.

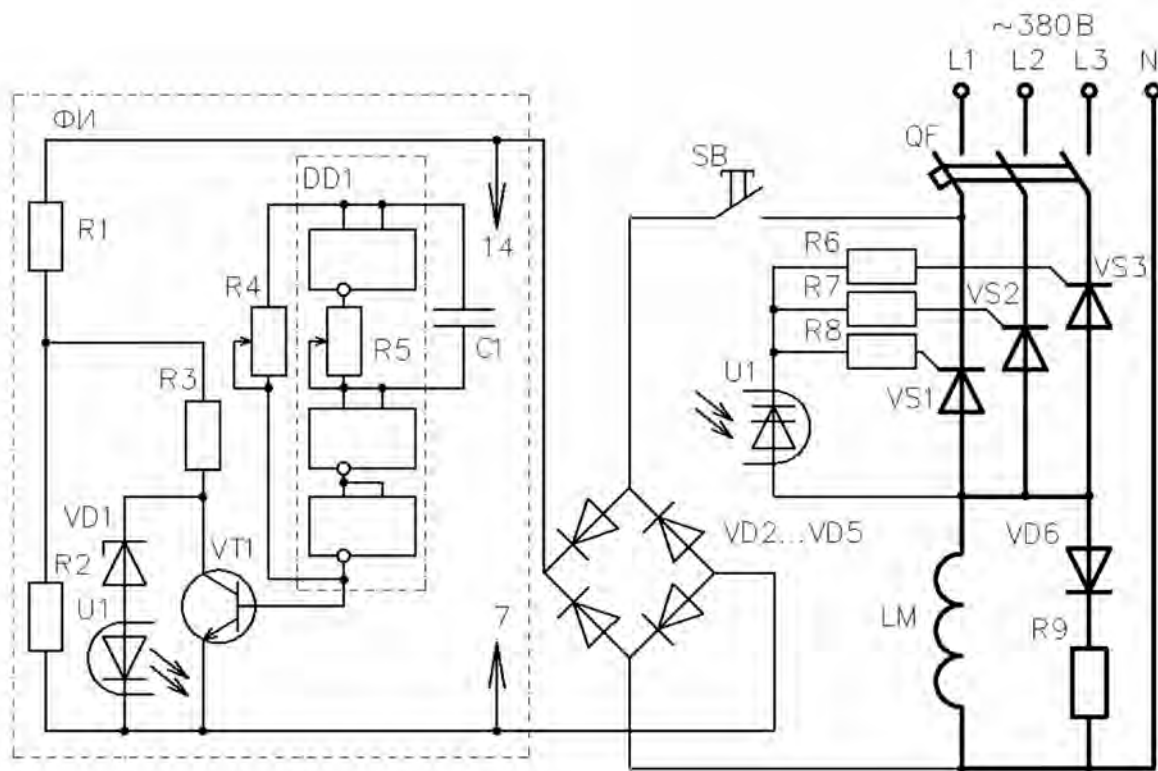
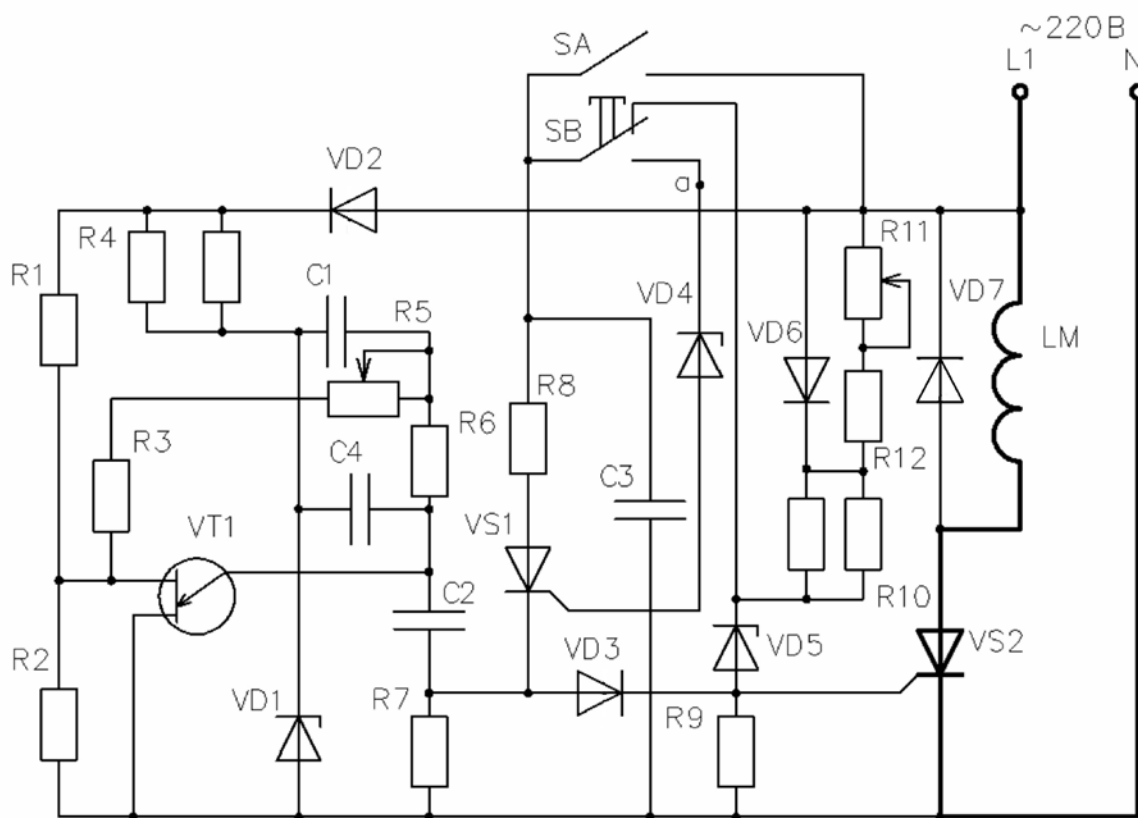


Рисунок 3.9 – Схема импульсного электрического преобразователя для питания ударной машины от трехфазной сети

В момент удара бойка ЛЭМД о наковальню на выходе микросхемы  $DD1$  появляется логическая единица, что приводит к отпиранию 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  $LM - VD6 - R9$ . Боек-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  $LM$  двигателя, тем самым управлять энергией удара электромагнитной машины. Резистором  $R5$  задают требуемую частоту управляющих импульсов и, следовательно, частоту ударов бойка-якоря ЛЭМД. Достоинством данного электрического преобразователя является стабильность выходных параметров.

Схема, представленная на рисунке 3.10, позволяет управлять электромагнитной ударной машиной от однофазной сети переменного тока.



*Рисунок 3.10 – Схема импульсного электрического преобразователя для питания УМ от однофазной сети*

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.

Генератор включает в себя однополупериодный 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 *VT*. 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 ИЭП 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  $VD4$ . Тиристор  $VS1$  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  $LM$  двигателя к сети, а якорь под действием нарастающего 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 кнопка  $SA$ . 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 тиристору  $VS1$ , 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 ударов ЛЭМД; стабилизация выходных параметров при отклонении питающего напряжения [24].

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 [19; 50; 63]. 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 полуволной выпрямленного напряжения сети линейных двигателей небольшой мощности ( $A_V < 35$  Дж) с ЭМУ [63].

Известные устройства для управления однообмоточными электромагнитными двигателями, включающие формирователь импульсов на однопереходном транзисторе, не позволяют совмещать одновременное управление работой дви-

гателя 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 работу устройства, показаны на рисунках 3.11, 3.12.

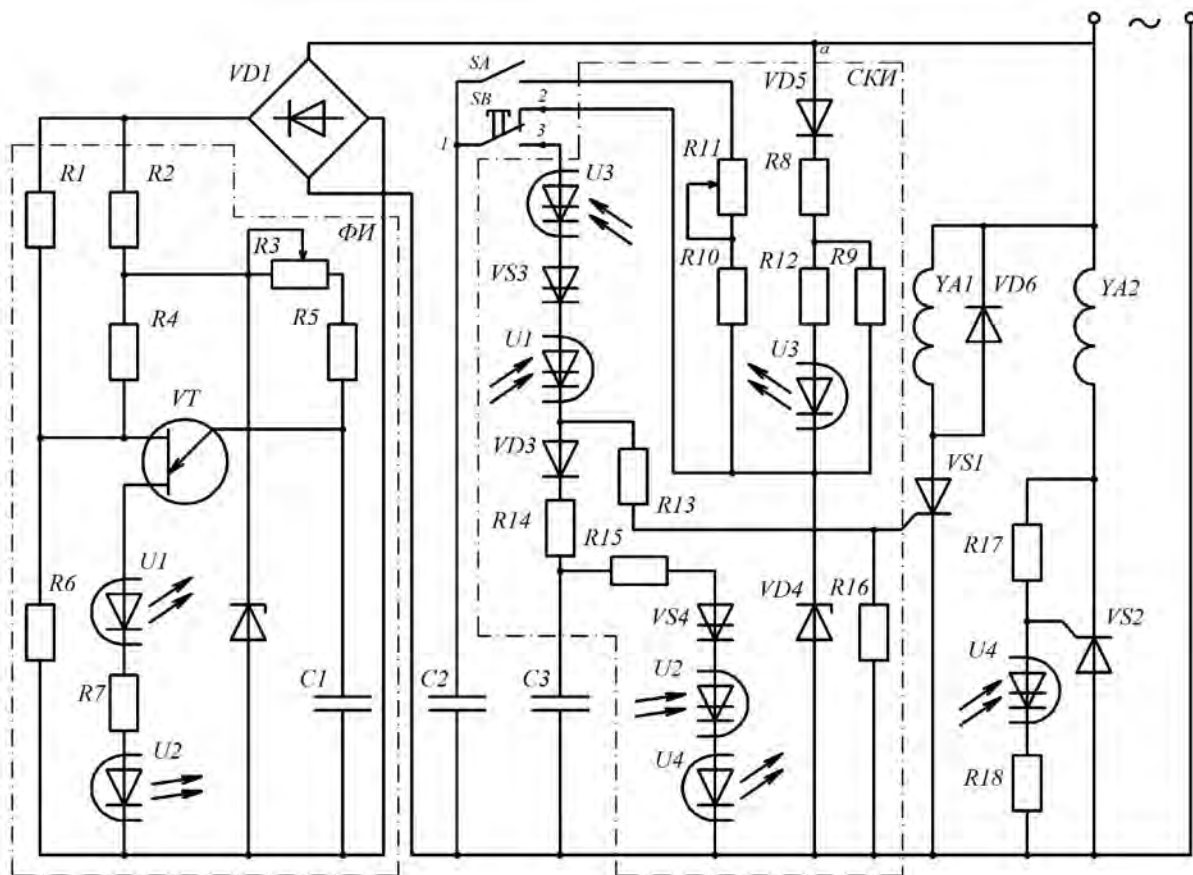


Рисунок 3.11 – Принципиальная электрическая схема управления ЛЭМД ударной машины с узлом статического нагружения якоря с  $A_y=25 \dots 35$  Дж

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.

При подаче напряжения на входные зажимы преобразователя и исходном положении органов управления ( $SA$ ,  $SB$ ) его работу определяют два самостоятельных процесса в блоках ФИ и СКИ. 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  $VD4$  (рисунок 3.12 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 (рисунок 3.12 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 (рисунок 3.12 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,  $t_1$ , рисунок 3.12 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 следующих 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.

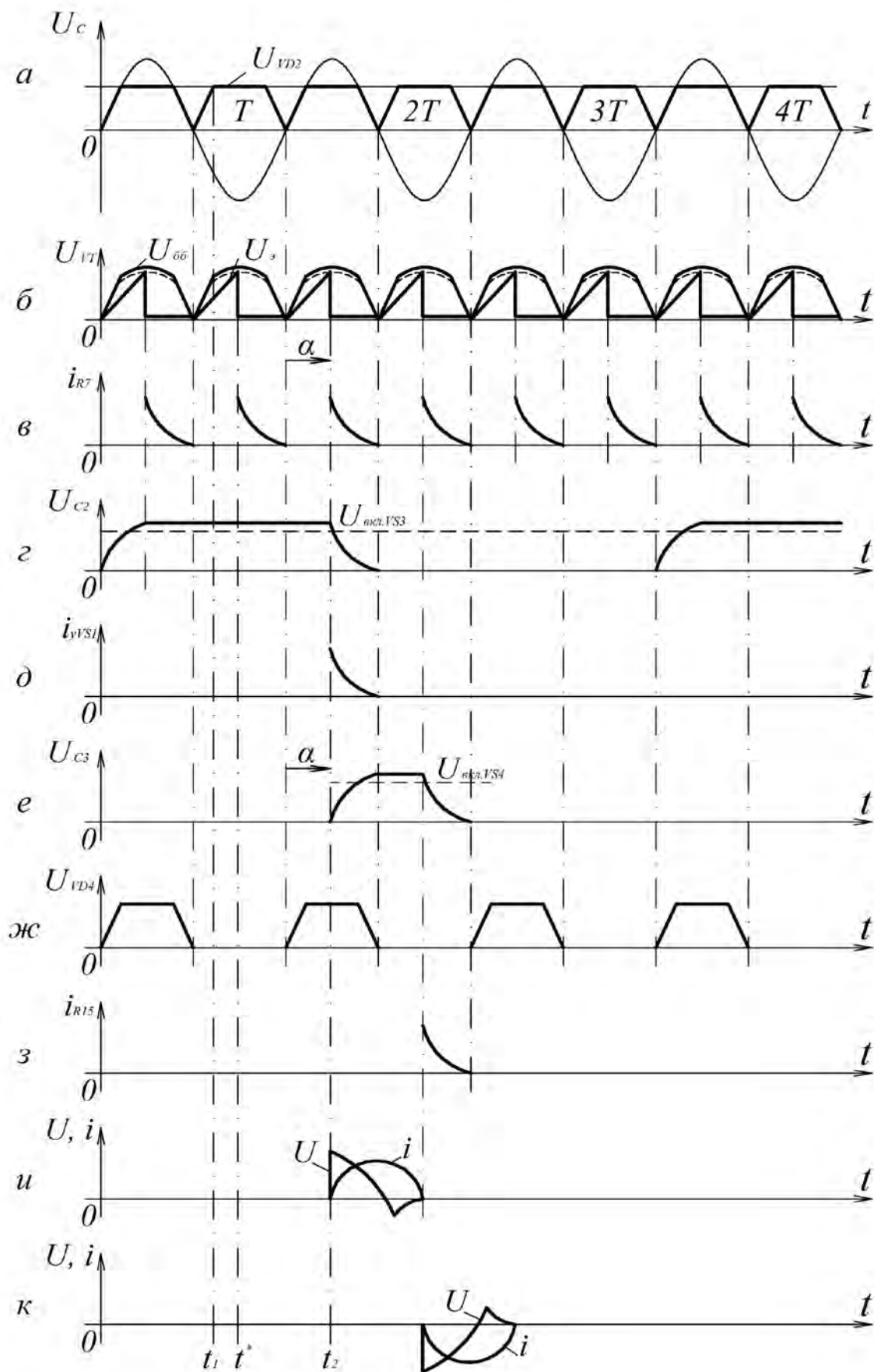


Рисунок 3.12 – Временные диаграммы преобразователя

Эти условия не выполняются в каждом отрицательном полупериоде питающего напряжения, когда клапан  $VD5$  заперт и светодиод  $U3$  погашен (момент  $t^*$  на рисунке 3.12 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  $VS1$  (момент  $t_2$  на рисунке 3.6 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 динистора  $VS4$ , то есть  $U_{C3} > U_{BKL\ VS4}$  (рисунок 3.12 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 тиристорам  $VS2$  и фототиристорам 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 якоря двигателя, нагруженного противодействующим усилием ЭМУ, возрастают, увеличивая запасенную магнитную, а значит, и механическую энергию  $A_y$  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 клапан  $VD5$  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 импульсного 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 импульса, питающего обмотки напряжения  $U$ , которое определяется углом управления  $\alpha$  тиристоров  $VS1$ ,  $VS2$ , зависящим от момента включения транзистора  $VT$  ФИ, задаваемого вручную переменным резистором  $R3$ :

$$U = (2/\pi)U_M((1 + \cos \alpha)/2), \quad (3.5)$$

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 обратно зависимым от изменений напряжения сети. Выразив продолжительность заряда времязадающего конденсатора  $C1$  через значение  $\alpha$  и параметры элементов схемы релаксационного генератора, определим угол управления [63]

$$\alpha = \frac{360}{T} (R3 + R5) C1 \ln \frac{U_{инп} - U_{выкл}}{U_{инп} - \eta R6 \frac{U_{инп} R1 + u_c R4}{R1 R6 + R1 R4 + R4 R6}}, \quad (3.6)$$

где  $T$  – период напряжения сети;  $U_{инп}$  – напряжение питания релаксационного генератора;  $U_{выкл}$  – напряжение выключения транзистора;  $\eta$  – коэффициент передачи  $VT$ ;  $u_c$  – мгновенное значение напряжения сети.

Соотношение (3.6) позволяет предварительно оценивать регулировочные и стабилизирующие свойства преобразователя. В работе [63] установлено, что в зависимости от глубины обратной связи коэффициент стабилизации ФИ с обратной связью по напряжению сети возрастает 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.

### 3.2.2 Импульсные электрические преобразователи, используемые с аккумуляторными источниками питания

При эксплуатации ударных машин с ЛЭМД в полевых условиях и на объектах без электроснабжения, например, машин для забивания электродов или стержней, их питание осуществляется от автономного аккумуляторного источника (АИП).

Рассмотрим несколько типов импульсных электрических преобразователей, подключаемых к аккумуляторным источникам питания, основные элементы которых представлены структурной схемой на рисунке 3.13. Дозирование энергии, передаваемой аккумулятором в обмотку ЛЭМД ударной машины, 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 ИЭП [50,76-80]. 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 [81].

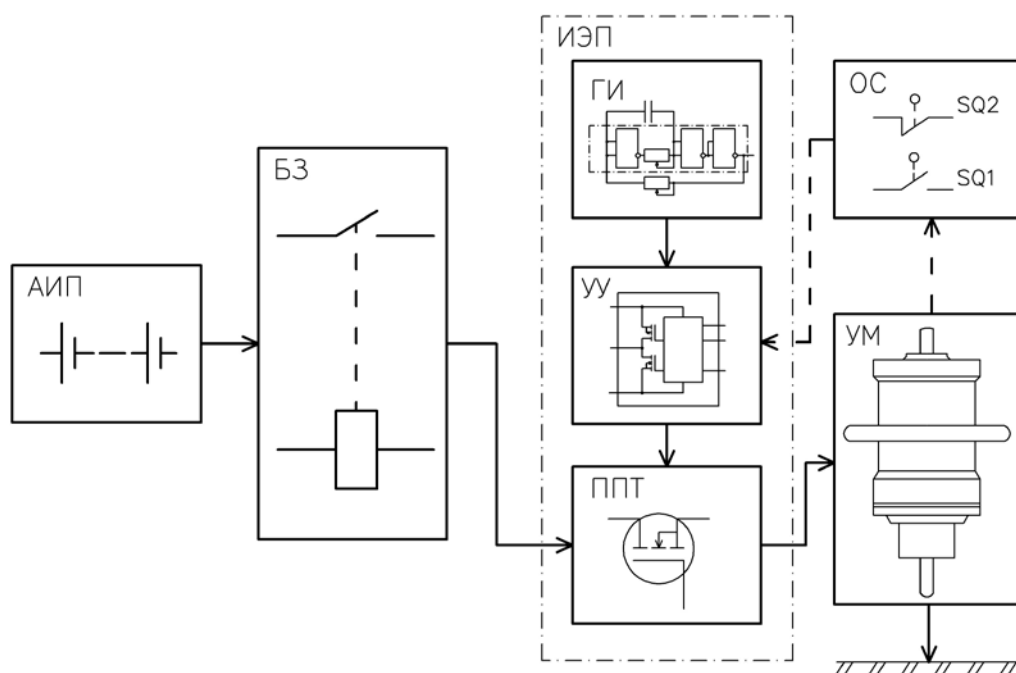


Рисунок 3.13 – Структурная схема импульсного преобразователя для УМ с аккумуляторным питанием

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 (рисунок 3.13). 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 (рисунок 3.13), который обеспечивает механическое отключение силовой цепи.

Для ИЭП, подключаемых к аккумуляторным источникам питания, характерным является сравнительно низкое напряжение питания (до 100В); большие токи нагрузки (50...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. Такие электрические преобразователи должны удовлетворять следующим требованиям:

- коммутировать большие токи (до 200А) при низком входном напряжении;
- система управления должна обеспечивать подачу управляющих импульсов при больших колебаниях входного напряжения
- схема должна иметь высокий КПД.

С учетом отмеченного разработана схема электрического преобразователя электромагнитной ударной машины с управлением в функции времени (рисунок 3.14 а), в котором моменты отпирания и запираания транзистора не зависят друг от друга, а определяются схемой УУ и синхронизированы с началом – окончанием рабочего хода бойка машины.

Силовая часть ИЭП включает в себя мощный транзистор *MOSFET VT1*, аккумуляторный источник питания *G* и обмотку *LM* импульсного ЛЭМД.

Для реализации режима последовательных срабатываний ЛЭМД с заданной частотой схема содержит устройство управления УУ, включающее микросхему *DD1* и формирователь импульсов *ФИ*, построенный на основе триггера Шмитта, который генерирует сигнал стандартной амплитуды логического уровня.

В микросхеме *DD1* приняты меры по обеспечению необходимых управляющих уровней, создан эквивалент гальванической развязки, применена защита от пониженного напряжения питания.

Заряд, накапливаемый в конденсаторе *C1* (рисунок 3.14 а), имитирует источник, который питает управляющую микросхему *DD1*, и поскольку она построена на полевых элементах, суммарная мощность, расходуемая на управление, незначительна и может быть быстро пополнена. Источник питания в динамическом режиме заменяется конденсатором соответствующей емкости, подзаряжающимся от источника питания этой микросхемы.

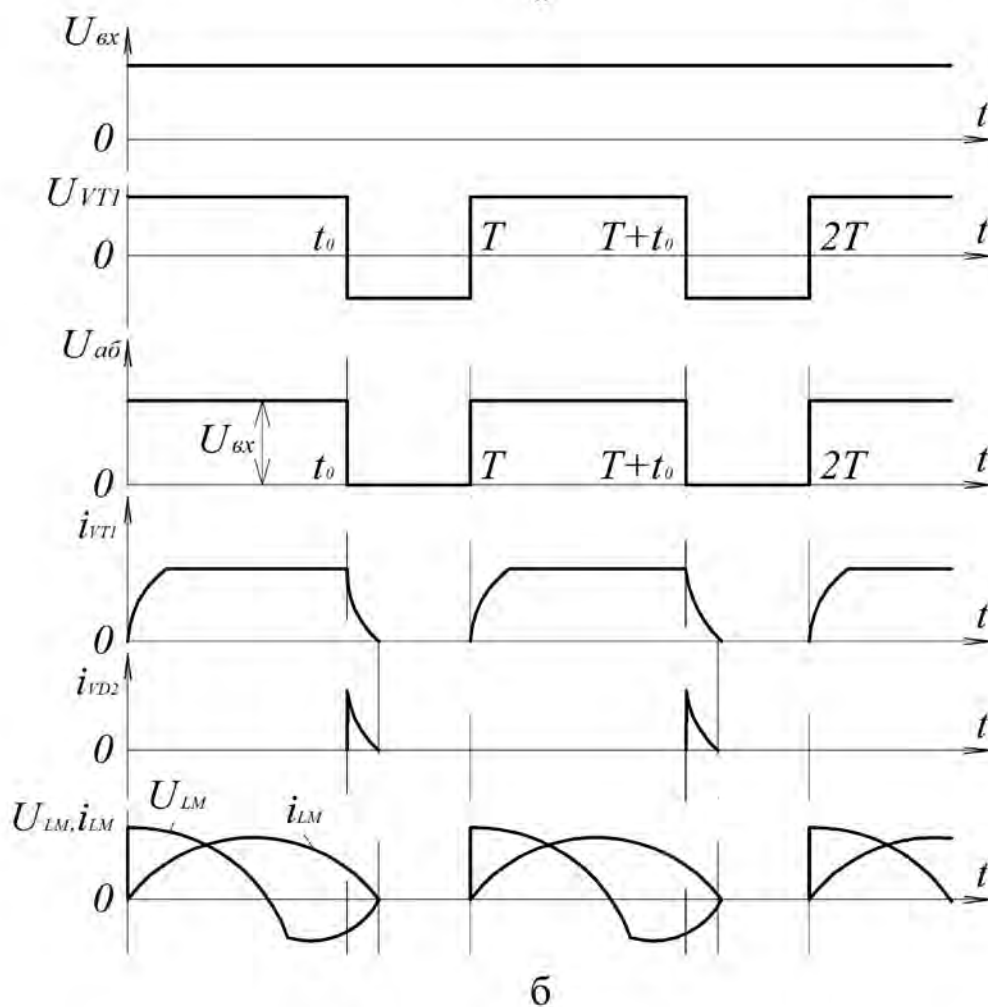
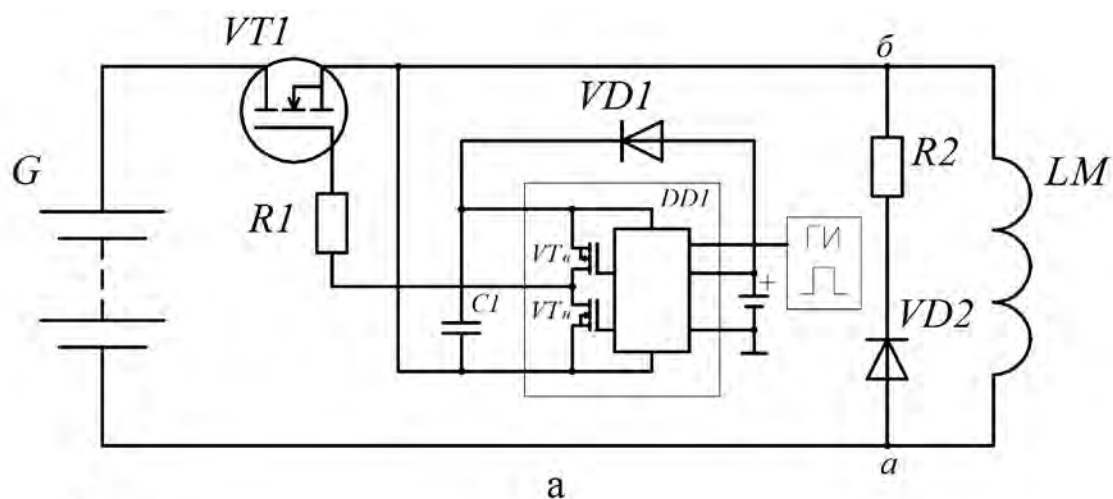


Рисунок 3.14 – Схема ЭП для питания ударной машины от аккумуляторного источника питания с управлением в функции времени (а) и временные диаграммы (б)

Если транзистор  $VT_n$  нижнего плеча проводит ток, исток транзистора верхнего плеча  $VT_e$  оказывается замкнутым на общий провод, диод  $VD2$  открывается и заряжает конденсатор  $C1$ . Когда транзистор нижнего плеча  $VT_n$  закрывается и начинает открываться транзистор  $VT_e$ , диод  $VD2$  оказывается подпертым, и

схема управления питается исключительно разрядным током  $CI$ . Разряд конденсатор  $CI$  через транзистор верхнего плеча  $VT_6$  приводит к отпиранию транзистора  $VT1$ , по обмотке  $LM$  протекает ток, вызывая срабатывание двигателя.

В момент удара бойка ЛЭМД о наковальню транзистор нижнего плеча  $VT_n$  микросхемы  $DD1$  переключается в открытое состояние, а транзистор верхнего плеча  $VT_6$  соответственно закрывается, что приводит к запираанию транзистора  $VT1$ . Якорь-боек под действием упругого элемента возвращается в исходное положение. Далее описанный цикл работы повторяется.

При слишком малой емкости конденсатор  $CI$  может разрядиться раньше времени и закрыть транзистор верхнего плеча  $VT_6$ , а при слишком большой – может не успевать заряжаться, поэтому величину емкости следует рассчитывать. Основными факторами, влияющими на разряд конденсатора  $CI$ , являются: величина заряда  $Q_{3VT1}$  затвора транзистора  $VT1$ ; ток потребления выходного каскада управляющей микросхемы  $DD1$  в статическом режиме  $I_{DD1}$ ; циклическое изменение заряда  $Q_3$  этой микросхемы  $DD1$ ; ток утечки  $I_{yVT1}$  затвора транзистора  $VT1$ ; ток утечки  $I_{yCI}$  конденсатора  $CI$  [81].

Минимальный заряд  $Q_{minCI}$  конденсатора  $CI$  определяется из выражения:

$$Q_{minCI} = 2 Q_{3VT1} + I_{DD1}/f + Q_3 + I_{yCI}/f + I_{yVT1}/f, \quad (3.7)$$

где  $f$  – частота коммутаций.

Так как величина токов утечки затвора  $I_{yVT1}$  транзистора  $VT1$  и  $I_{yCI}$  конденсатора  $CI$  мала, то перечисленными факторами можно пренебречь. С учетом (3.7) представим выражение для определения емкости конденсатора  $CI$  [81]:

$$CI \geq 2[2 Q_{3VT1} + I_{DD1}/f + Q_3]/(U_{numDD1} - U_{VD2}), \quad (3.8)$$

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 рисунке 3.14 б.

Характерным для данного ИЭП 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 электромагнитного привода. Так, например, частота ходов бойка УМ при забивке может существенно меняться, что обусловлено неоднородностью грунта, в который погружается элемент, изменением его сопротивления внедрению. Поэтому частота импульсов управления, подаваемых к транзисторам ИЭП должна

соответствующим образом меняться, что при данном способе управления обеспечить затруднительно.

Наибольшая частота ходов бойка электромагнитной ударной машины, ее максимальная мощность и производительность обеспечивается в автоколебательном, близком к резонансному, режиме работы с управлением в функции положения рабочего органа. В отличие от разомкнутой системы управления в функции времени, рассмотренной выше, такая система является замкнутой и имеет обратную связь по положению бойка-якоря, которая обеспечивается датчиками, размещенными на ударной машине.

Принципиальная электрическая схема ИЭП с управлением в функции положения бойка-якоря ЛЭМД машины для погружения стержневых элементов в грунт представлена на рисунке 3.15 а.

Включение электрического преобразователя осуществляется нажатием кнопки *SB2*, отключение по окончании работы – нажатием кнопки *SB1*. Управление работой машины производится тумблером *SA*, расположенным на ударной машине.

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 *UI*, засвеченный фототиристор, включенный в цепь управления тиристора *VS1*, открывается. Благодаря включению *VS1* происходит механическое размыкание силовой цепи контактором *KM*.

Силовая часть ЭП представлена аккумуляторным источником питания *G*, обмоткой *LM* ЛЭМД и прерывателем постоянного тока на транзисторе *VT1*. Управление работой ИЭП производится с помощью контактных датчиков верхнего уровня *SQ1* и нижнего уровня *SQ2*, размещенными на ударной машине.

Так как контакт датчика верхнего положения *SQ1* замкнут, то после нажатия кнопки *SB2* и замыкания контактов *KM* при включенном тумблере *SA* отпирается транзистор *VT1*. По обмотке *LM* начинает протекать ток, который создает магнитное поле, разгоняющее якорь УМ. Перед ударом бойка о наковальню контакт датчика нижнего уровня *SQ2* замыкается, формируются сигналы на запирающие 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.

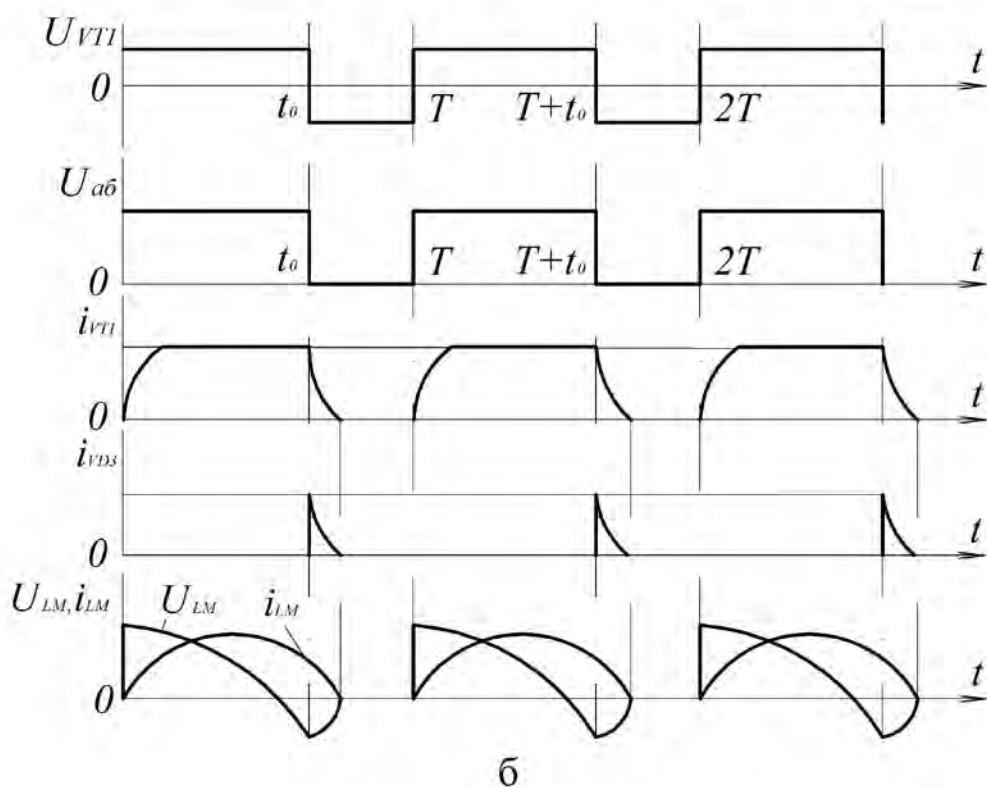
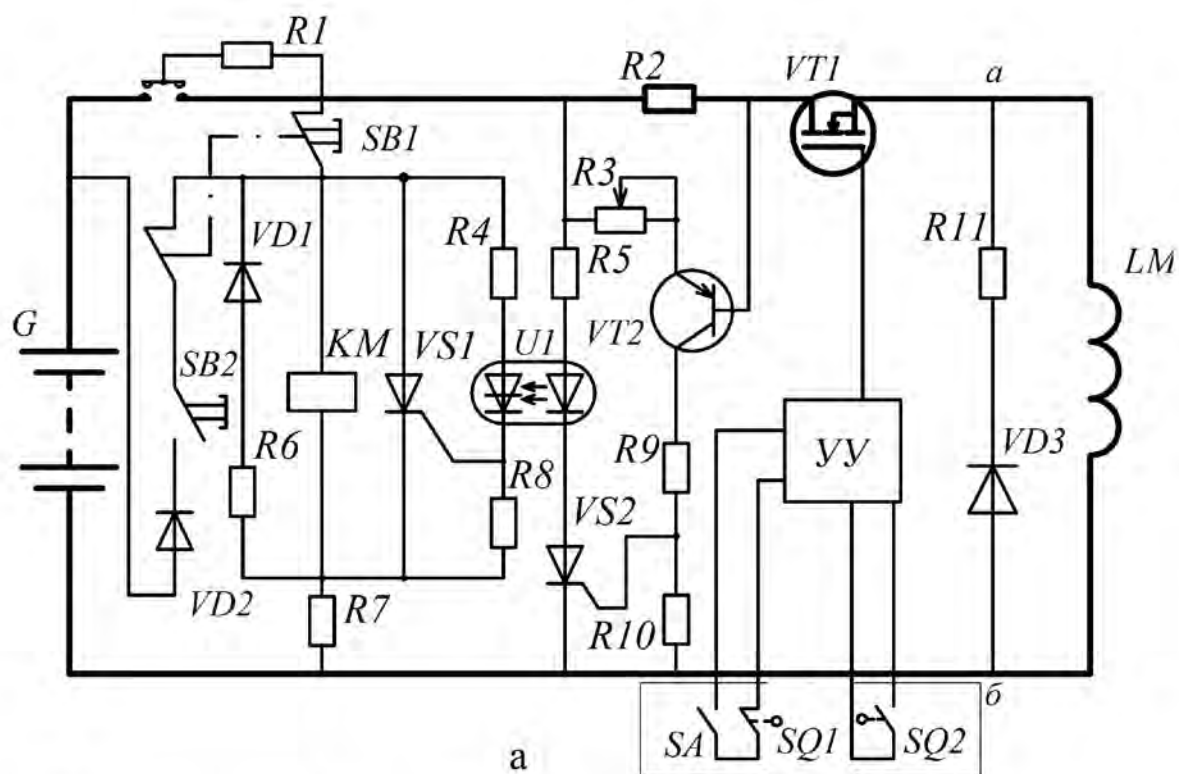


Рисунок 3.15 – Схема ЭП для питания ударной машины от аккумуляторного источника питания с управлением в функции положения рабочего органа (а) и временные диаграммы (б)

Достоинством данной схемы электрического преобразователя с управлением в функции положения рабочего органа является автоматическая самонастройка электромагнитной машины на режим забивки, определяемый изменени-

ем условий работы – жесткости грунта, разряженности источника питания, температуры окружающей среды и др.

Тепловой расчет силового каскада ИЭП является одним из важнейших этапов процесса разработки, позволяющий подтвердить правильность выбора и применения прерывателя постоянного тока ППТ на транзисторе MOSFET и во многом определяющий надежность работы. Поскольку полевые транзисторы не имеют вторичного пробоя, то в расчетах можно руководствоваться значениями максимальной температуры и максимальной рассеиваемой мощности [80; 81].

Транзистор выбран правильно, если выполняется условие [80]:

$$\Theta_{n.пер} \leq \Theta_{n.дон}; \quad (3.9)$$

$$\Theta_{n.пер} = t_n - t_{окр}; \quad \Theta_{n.дон} = t_{n.макс} - t_{окр} \quad (3.10)$$

где  $\Theta_{n.пер}$ ,  $\Theta_{n.дон}$  – соответственно температура перегрева перехода действительная и максимально допустимая по сравнению с наибольшей температурой окружающей среды  $t_{окр}$ ,  $t_n$  – температура переходов.

Если выполняется условие

$$P_n \leq P_{n.дон}, \quad (3.11)$$

где  $P_n$  – полная рассеиваемая мощность;  $P_{n.дон}$  – максимально допустимая мощность рассеяния прибора при наибольшей окружающей температуре, то автоматически выполняется условие (3.9).

Полная мощность  $P_n$ , выделяющаяся в транзисторе во время его переключения, определяется из выражения [80]:

$$P_n = P_{пер} + P_{np} + P_{ynp} + P_{ym}, \quad (3.12)$$

где  $P_{пер}$  – потери мощности при переключении;  $P_{np}$  – потери на активном сопротивлении открытого транзистора;  $P_{ynp}$  – потери на управление в цепи затвора;  $P_{ym}$  – потери мощности за счет тока утечки в закрытом состоянии.

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  $P_{ynp}$  [80], поэтому потери на управление также исключим из расчетов. Тогда выражение (3.12) приобретает следующий вид:

$$P_n = P_{пер} + P_{np}, \quad (3.13)$$

В нем потери проводимости  $P_{np}$  являются основной составляющей потерь в полевом транзисторе [81]:

$$P_{np} = R_{cu} I_{c(д)}^2, \quad (3.14)$$

где  $R_{cu}$  – сопротивление транзистора в открытом состоянии;  $I_{c(д)}$  – действующее значение тока стока.

Для импульсов тока прямоугольной формы среднеквадратическое значение  $I_{c(д)}$  определяется по выражению [81]:

$$I_{c(o)} = I_1 \sqrt{\chi}, \quad (3.15)$$

где  $\chi = \tau/T$  – скважность импульсов;  $\tau$  – 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 [81]:

$$P_{nep} = (U_n i_{c(o)} t_f f) / 2, \quad (3.16)$$

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 (3.11), то температура перехода не превысит максимально допустимую.

Если условие (3.11) не выполняется, то транзистору нужен теплоотвод (радиатор). Перегрев перехода в этом случае определяется соотношением

$$\Theta_{n,nep} = \Delta t_{нк} + \Delta t_{кр} + \Delta t_{рс} = P_n R_{м.нк} + P_n R_{м.кр} + P_n R_{м.рс}, \quad (3.17)$$

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.

В технической документации на транзисторы обычно приводятся нормированные переходные характеристики теплового сопротивления «переход – корпус»  $R_{м.нк}$ , которое в значительной степени зависит от частоты переключения  $\nu$  транзистора, а также от скважности  $\chi$ , определяемой отношением времени открытого состояния  $\tau$  к полному периоду коммутации  $T$  (рисунок 3.16) [80; 81]. Сопротивление  $R_{м.кр}$  определяется [80] 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 [80]:

$$R_{м.рс} = 1 / \alpha_k S_o, \quad (3.18)$$

где  $S_o$  – поверхность охлаждения;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи.

Подробный расчет теплового режима транзисторов изложен в [80; 81].

### 3.2.3 Импульсные электрические преобразователи с емкостными накопителями энергии

Характеристики импульсной нагрузки и системы электропитания, как правило, не согласованы. Большинство систем электропитания рассчитано не на импульсный, а на непрерывный и относительно равномерный отбор мощности. Поэтому возникает необходимость включения между источником питания и ЛЭМД ударной машины импульсного электрического преобразователя с емкостным накопителем энергии (ЕНЭ), задачей которого, в том числе, является согласование режимов и характеристик системы электроснабжения и ЛЭМД ударной машины.

Так, для аккумуляторного источника питания применение импульсного преобразователя с ЕНЭ существенно облегчает электрический режим, обеспечивая энергоотдачу аккумуляторов при заряде ЕНЭ, близкую к стационарной.

Обобщенная структурная схема ИЭП с емкостным накопителем энергии показана на рисунке 3.16. Ударная машина УМ питается от аккумуляторного источника питания АИП через электрический преобразователь ИЭП с ЕНЭ. Энергетическая часть ИЭП включает в свой состав три функциональные части: собственно емкостный накопитель энергии ЕНЭ, зарядное устройство ЗУ и прерыватель постоянного тока ППТ. При этом функцию согласования характеристик с АИП выполняют ЗУ и ЕНЭ, а функцию согласования с режимами и характеристиками ЛЭМД – ЕНЭ и ППТ. В схему зарядного устройства ЗУ включен DC-DC-преобразователь постоянного напряжения КВ (конвертор) [50; 82].

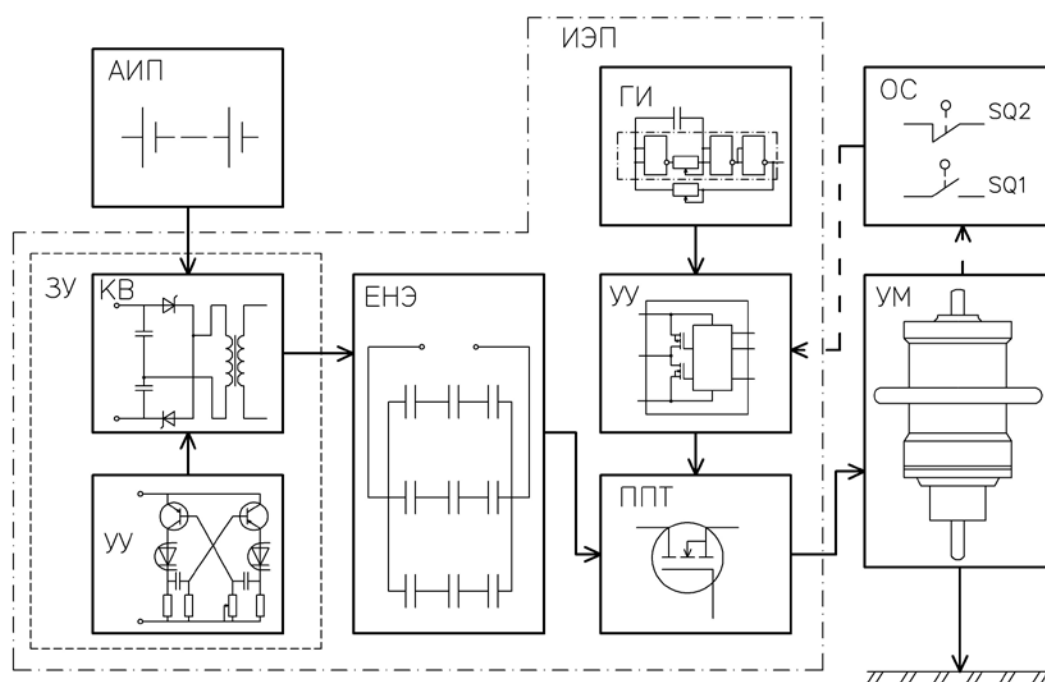


Рисунок 3.16 – Структурная схема импульсного преобразователя с емкостным накопителем энергии для питания УМ

На рисунке 3.17 представлена электрическая схема ЭП с емкостным накопителем энергии для питания электромагнитной ударной машины. Силовая часть электрического преобразователя содержит обмотку  $LM$  ЛЭМД УМ, коммутирующий элемент на транзисторе  $VT1$ , конденсаторную батарею  $C_n$ , заряд которой осуществляется от аккумуляторного источника питания  $G$  через зарядное устройство ЗУ с емкостными дозирующими элементами  $C1$  и  $C2$ , выполненного на тиристорах  $VS1$  и  $VS2$  [82].

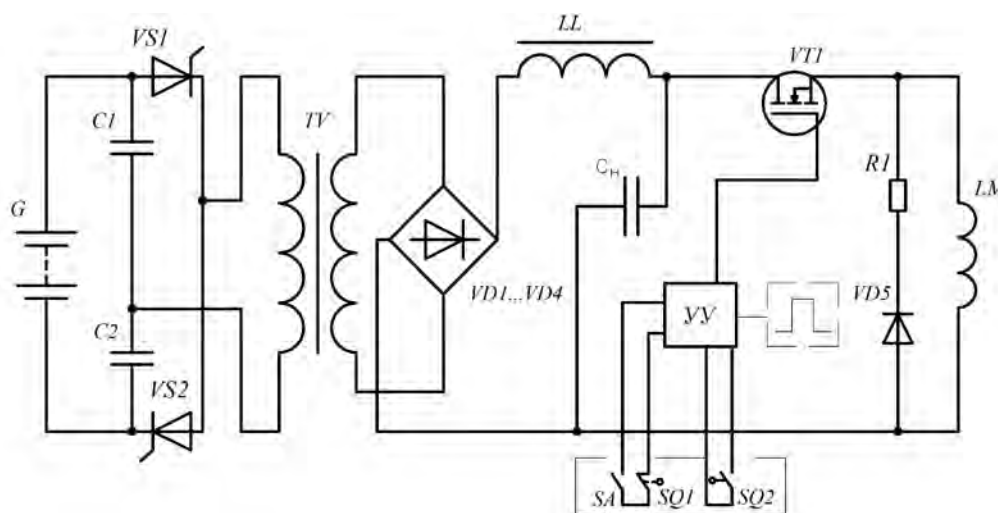


Рисунок 3.17 – Электрическая схема импульсного преобразователя с емкостным накопителем энергии для питания УМ

В момент времени  $t_1$  отпирается тиристор  $VS1$ , и происходит одновременный заряд конденсатора  $C2$  и разряд конденсатора  $C1$  (рисунок 3.17) по контуру, включающему в себя трансформатор  $TV$ , два вентиля диодного моста  $VD1 - VD4$  и емкостный накопитель  $C_n$ . Ток заряда при этом нарастает по синусоидальному закону до момента  $t_2$ , когда напряжение на конденсаторе  $C1$  упадет до нуля, а напряжение на конденсаторе  $C2$  нарастет до напряжения источника  $U_{\text{вх}}$ . Зарядный ток, поддерживаемый энергией, накопленной в магнитном поле дросселя  $LL$ , в контуре  $C_n - LL - VD1 - VD4$  спадает до момента  $t_3$ .

Напряжение на конденсаторной батарее  $C_n$  растет на обоих интервалах  $t_1 - t_2$  и  $t_2 - t_3$ . В момент  $t_3$  включается тиристор  $VS2$  и процессы повторяются с той лишь разницей, что теперь заряжается конденсатор  $C1$ , а разряжается конденсатор  $C2$  и колебательный процесс может происходить с некоторого начального значения тока  $I_{C01}$ .

Время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств, совпадает с интервалом спада тока  $t_{\text{сн}}$  и равно разности между периодом переключения тиристоров  $T$  и временем передачи энергии в зарядный контур  $t_n$ . Из временной диаграммы на рисунке 3.18 а видно, что напряжение  $U_c$  в емкост-

ном накопителе  $C_H$  возрастает ступенчато. Энергия  $W_{эл}$ , передаваемая в зарядный контур на интервале  $t_n$ , равна  $W_{эл} = 0,5 C I U_{ex}^2$  [82].

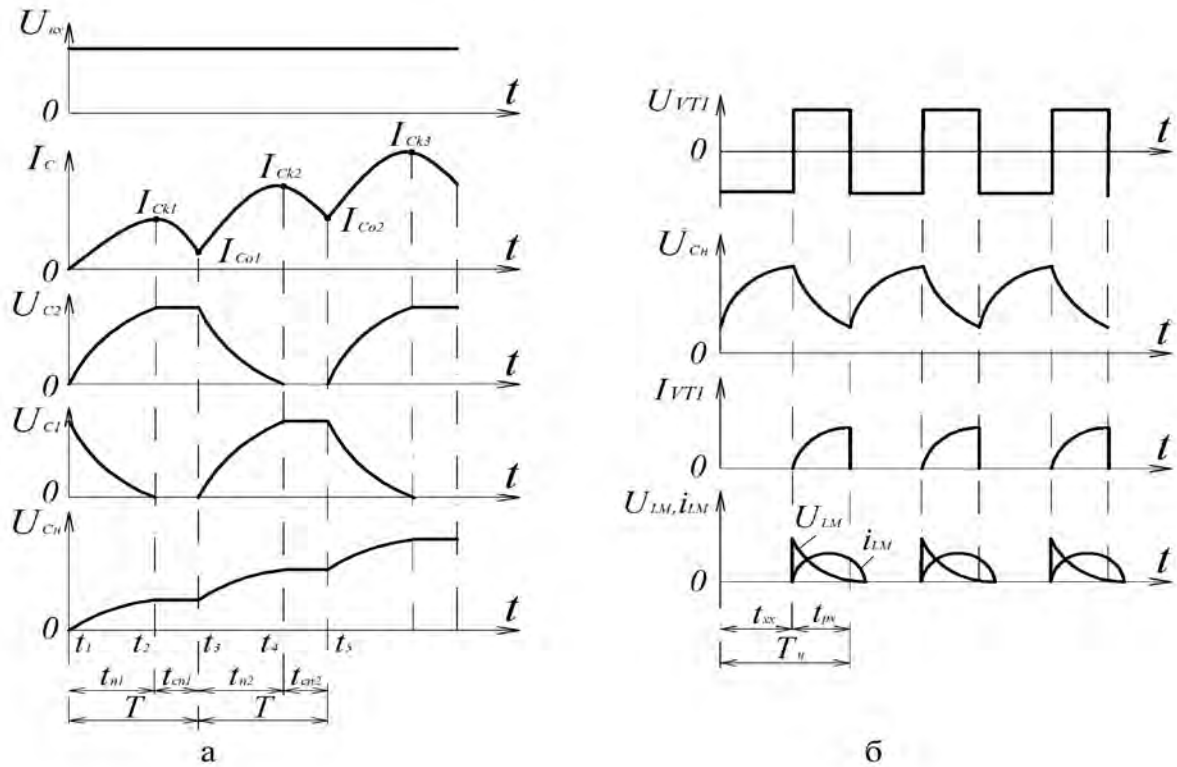


Рисунок 3.18 – Временные диаграммы процессов для зарядного устройства (а) и импульсного преобразователя (б)

При анализе процессов в режиме непрерывного зарядного тока необходимо учитывать начальные значения токов на каждом зарядном импульсе.

Рекуррентную связь начальных токов можно получить из энергетических соотношений, считая, что напряжение на накопителе на  $k$ -м импульсе  $U_{Ck}$  неизменно и определяется той энергией, которая передана в накопитель за  $k-1$  предыдущих импульсов. Тогда энергия в накопителе на  $k$ -м импульсе

$$W_{Ck} = 1/2 [C_9 U_{ex}^2 (k-1) - I_{CO(k-1)}^2 L]. \quad (3.19)$$

Напряжение заряда

$$U_{Ck} = \sqrt{C_9 / C_H U_{ex}^2 (k-1) - I_{CO(k-1)}^2 L}, \quad (3.20)$$

где

$$C_9 = C_1 + C_2.$$

Время передачи энергии на  $k$ -м зарядном импульсе определяется по формуле [82]:

$$t_{nk} = \tau_9 [\pi/2 - \arctg((I_{CO(k-1)} \rho_9) / (U_{ex} - U_{Ck})) - \arctg(I_{Ck} \rho_9 / U_{Ck})], \quad (3.21)$$

где  $\tau_9 = \sqrt{LC_9}$ ;  $\rho_9 = \sqrt{L/C_9}$ .

Время спада тока на  $k$ -м импульсе

$$t_{cn\kappa} = T - t_{нк}. \quad (3.22)$$

Значение тока в дросселе в конце  $\kappa$ -го зарядного импульса можно вычислить по формуле

$$i_{L\kappa} = U_{ex} \sqrt{C_{\Sigma} \kappa / L}. \quad (3.23)$$

Дозирование энергии, передаваемой из емкостного накопителя  $C_n$  в обмотку  $LM$  ЛЭМД, осуществляется с помощью коммутационного элемента, выполненного на транзисторе  $VT1$ . Управление импульсной машиной может производиться как в функции времени с помощью генератора импульсов ГИ, так и в функции положения бойка УМ с помощью датчиков положения ДП  $SQ1$  и  $SQ2$ .

При отпирании транзистора  $VT1$  часть запасенной энергии из емкостного накопителя  $C_n$  передается в обмотку  $LM$  ЛЭМД. Под действием электромагнитного поля якорь осуществляет рабочий ход. После совершения удара бойка о наковальню транзистор  $VT1$  запирается, остаточное магнитное поле рассеивается на диоде  $VD5$  и на резисторе  $R1$ , якорь-боек возвращается в исходное положение. При этом дозаряд конденсаторной батареи происходит как во время рабочего хода якоря  $t_p$ , так и во время холостого хода  $t_{xx}$ . Далее описанный цикл работы повторяется.

Достоинством данного импульсного электрического преобразователя является наличие конвертора КВ, что позволяет заряжать ЕНЭ напряжением  $U_c$ , превышающим напряжение источника питания  $U_{ex}$ . Это значительно улучшает массогабаритные показатели устройства, однако увеличение частоты ходов якоря приводит к неоднозначности передаваемой в обмотку  $LM$  электрической энергии  $W_{эл}$ .

Для повышения частоты ударов машины с ЛЭМД предложен электрический преобразователь с секционированным емкостным накопителем энергии (рисунок 3.19).

Силовая часть импульсного преобразователя включает в себя четыре группы конденсаторных накопителей энергии  $C1 - C4$ , заряжаемые от источника постоянного тока (батареи  $G$ ), силовые тиристоры  $VS1 - VS4$  и обмотку  $LM$  двигателя.

Для реализации режима последовательных срабатываний УМ с заданной частотой схема содержит формирователь импульсов ФИ, 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  $VS1 - VS4$ .

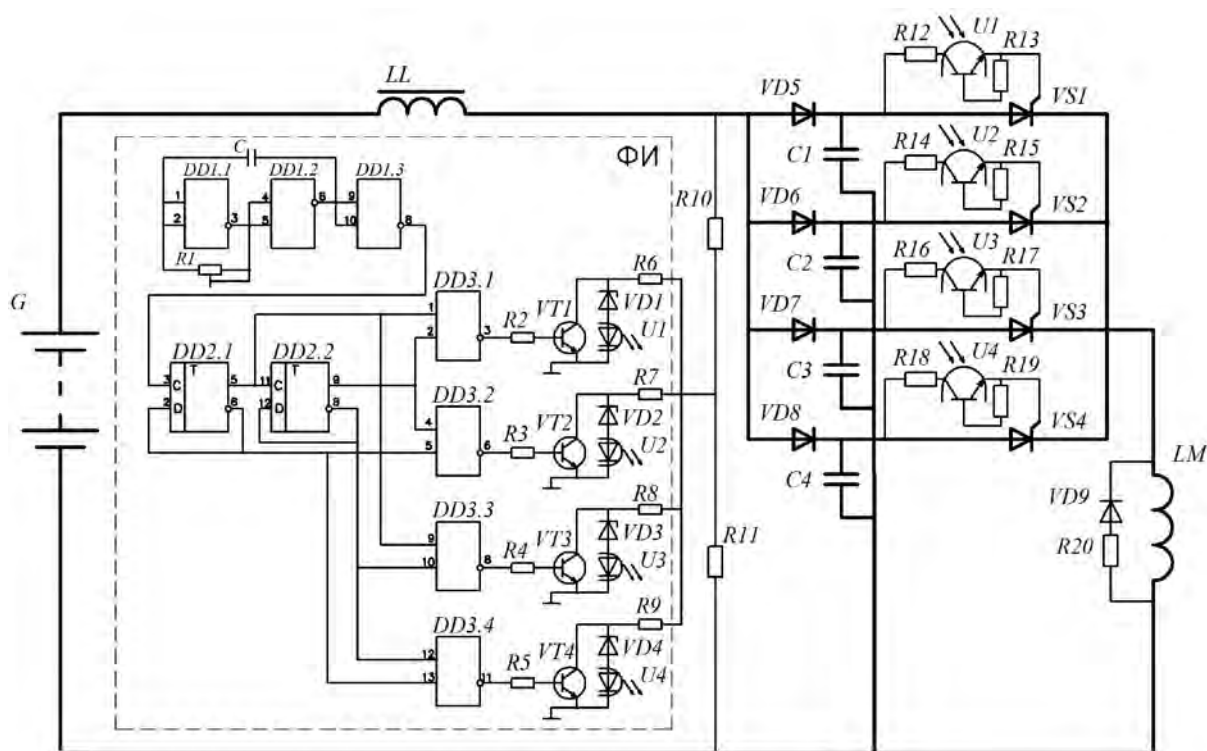


Рисунок 3.19 – Электрическая схема импульсного преобразователя с секционированным ЕНЭ энергии для питания УМ

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 тириستоров. Для уменьшения бросков тока при отпирании тиристоров служит дроссель  $LL$ .

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 определенном 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 тири-

стор отпирается, а конденсаторная батарея  $C4$  разряжается на обмотку  $LM$ , обеспечивая срабатывание ЛЭМД УМ.

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 ударной машины с ЛЭМД, а разрядившийся накопитель  $C4$  начинает заряжаться. Аналогично при третьем импульсе генератора разряжается конденсаторная группа  $C2$ , при четвертом –  $C3$ . Далее описанный цикл работы схемы повторяется.

Частота переключений генератора импульсов подбирается в соответствии с временем одного цикла ЛЭМД:

$$f=1/T_{\text{ц}}, \quad (3.24)$$

где  $T_{\text{ц}} = t_{\text{ср}} + t_{\text{воз}}$ .

Как видно из временной диаграммы процессов в преобразователе, представленной на рисунке 3.20, любая разряженная конденсаторная батарея к моменту следующего срабатывания полностью заряжается.

Достоинствами данного электрического преобразователя являются:

- управление выходной энергией удара путем подбора емкости конденсаторной батареи и уровня ее заряда;
- отсутствие зарядных устройств конденсаторных батарей вследствие небольших емкостей;
- незначительные потери энергии;
- естественное запирающее действие тиристоров, приводящее к уменьшению эффекта «залипания» якоря ЛЭМД;
- необходимые частоты срабатывания ударной машины;
- работоспособность при выходе из строя любой из группы конденсаторов.

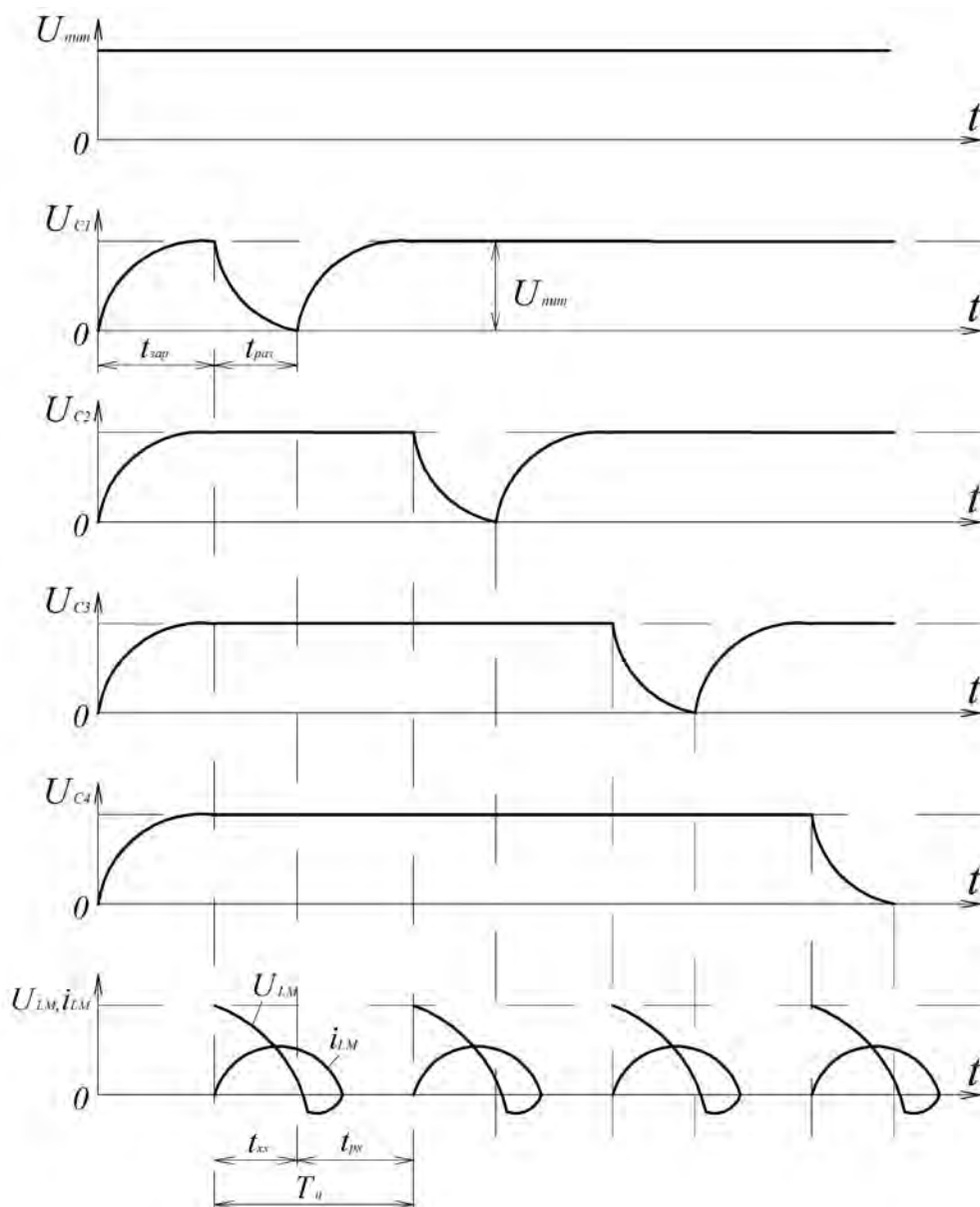


Рисунок 3.20 – Временные диаграммы процессов электрического преобразователя с емкостными накопителями энергии

Однако увеличенное количество коммутационных элементов, в сравнении с электрическими преобразователями на рисунке 3.17, усложняет схему, увеличивает ее стоимость и снижает надежность. Поскольку формирователь импульсов ФИ выполнен на микросхемах, то выход из строя любого элемента схемы управления приводит к замене всего блока.

Энергопреобразование в ЛЭМД с питанием от промежуточного емкостного накопителя энергии подробно рассмотрено в главе 5.

## 4 ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛЭМД ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН

### 4.1 Методы расчета тепловых процессов в ЛЭМД импульсных машин

Энергопреобразование в линейных электромагнитных двигателях сопровождается необратимыми потерями, проявляющимися в виде теплоты, образование которой в их активных частях нарушает тепловую однородность. Это ведет к перетоку теплоты от токоведущих частей к другим элементам ЛЭМД и внешней среде. 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 [83].

Обеспечение определенного температурного режима является основной задачей организации охлаждения ЛЭМД импульсных машин. Решение ее состоит в обеспечении рационального сочетания источников тепловыделения и стоков теплоты [84; 85].

Основными источниками тепловыделения в ЛЭМД являются активные части – обмотка и статор.

Потери в меди двигателя определяются сопротивлением обмотки и квадратом тока:

$$\Delta P_m = I^2 r = I^2 \rho \frac{l}{S}, \quad (4.1)$$

где  $\rho = \rho_{293} [1 + \beta(T - 293)]$  – удельное сопротивление медного проводника;  $\rho_{293}$  – удельное сопротивление медного проводника при  $T=293$  К;  $\beta$  – температурный коэффициент сопротивления;  $T$  – температура обмотки;  $l$  – длина проводника;  $S$  – поперечное сечение проводника [83].

Потери в стали зависят, в частности, от геометрии деталей якоря и статора ЛЭМД и не превышают 7% [24].

Для достижения установившегося температурного режима двигателя систему теплоисточников необходимо дополнить стоком теплоты, мощность которого равна суммарной мощности источников. Такой сток обеспечивается путем контакта границ тепловыделяющих элементов с внешней средой, имеющей постоянную температуру. Исследование такого стока определяет наличие в тепловой системе двух видов теплопереноса: теплопроводности в твердых телах и конвекции на границе их с внешней средой [83; 86; 87].

Перенос теплоты теплопроводностью определяется законом Фурье:

$$q_\lambda = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (4.2)$$

который связывает плотность теплового потока  $q_\lambda$  в направлении нормали  $n$  к изотермической поверхности с градиентом температуры  $\theta$ . При этом интенсивность теплопереноса характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ .

Конвективный перенос теплоты описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$q_\alpha = \alpha(\theta_{zp} - \theta_{окр}), \quad (4.3)$$

устанавливающим связь плотности теплового потока на границе  $q_\alpha$  с разностью температур этой границы  $\theta_{zp}$  и окружающей среды  $\theta_{окр}$ . Интенсивность теплопереноса характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

Как видно из выражений (4.2), (4.3), чем больше расстояние между источником и стоком теплоты, тем выше температура источника при фиксированной температуре стока, а чем больше поверхность, соответствующая границе системы, тем меньше перепады температуры. Следовательно, при организации и размещении теплостоков необходимо разделять их на несколько в соответствии с числом источников теплоты. При этом стоки следует размещать в непосредственной близости от источников, избегая наличия между ними пассивных тел [83; 86; 87].

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

Наиболее строгим является метод температурного поля, при котором решается дифференциальное уравнение (4.4) при граничных условиях (4.5)-(4.7) для электромашин в целом или для части ее, определяемой тепловой симметрией или периодичностью [86; 87].

$$\nabla(\lambda \nabla T) + \frac{P_a}{V_a} = 0, \quad (4.4)$$

$$q(x, y, z)_{zp} = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp}, \quad (4.5)$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{zp} = \alpha(T_{zp} - T_0), \quad (4.6)$$

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{z,\kappa} = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{z,\kappa}, \quad (4.7)$$

где  $P_a$  – тепловыделение;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T$  – температура;  $x, y, z$  – координаты.

В общем случае необходимо учитывать зависимость тепловыделения  $P_a$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от температуры  $T$  и

координат  $x, y, z$  при граничном условии III рода на поверхностях, обдуваемых воздухом переменной температуры  $T_0$ , и условия  $\partial T/\partial n=0$  на остальных поверхностях.

Решение такой задачи возможно только с применением численных методов, например метода конечных разностей и метода конечных элементов [87-89]. Принципиальных трудностей расчет этим методом трехмерного поля температуры в электромашинах 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 – в обмотке и статоре.

Характерными для теплового расчета электромагнитных двигателей являются методы температурных полей, эквивалентных греющих потерь, тепловых схем замещения [90] и др. С достаточной для практических целей точностью расчет удобно производить методом тепловых схем замещения (ТСЗ) со следующими допущениями:

- коэффициент теплопроводности не зависит от температуры;
- теплоотдающие поверхности считаются теплоэквипотенциальными;
- источники теплоты в обмотке равномерно распределены по ее объему;
- температурное поле считается близким к стационарному.

При расчете линейный электромагнитный двигатель целесообразно представить совокупностью различающихся по тепловым характеристикам элементов (рисунок 4.1 а): электрические – обмотка 1, элементы магнитной системы – статор 2 и якорь 5, конструктивные элементы – крышки 4, 6, прокладка 3 и др.

Тепловая схема замещения ЛЭМД (рисунок 4.1 б) составлена на основе конструктивной схемы (рисунок 4.1 а) и учитывает тепловые сопротивления изоляции обмотки, паразитных зазоров, воздушных промежутков между статором и обмоткой и т.д.

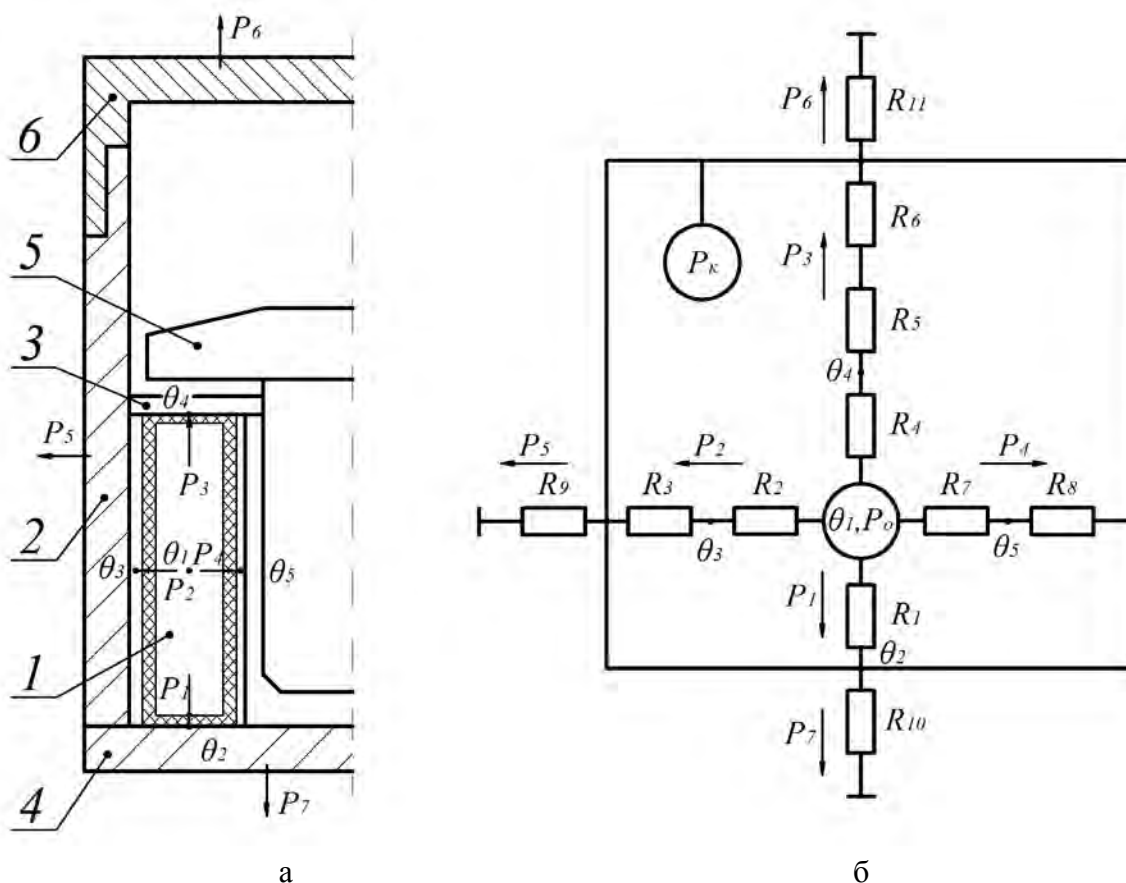


Рисунок 4.1 – Конструктивная схема линейного электромагнитного двигателя (а) и тепловая схема замещения (б)

Распределение тепловых потоков  $P$  целесообразно рассматривать отдельно для обмотки  $P_o$  (рисунок 4.2 а) и корпуса  $P_k$  (рисунок 4.2 б).

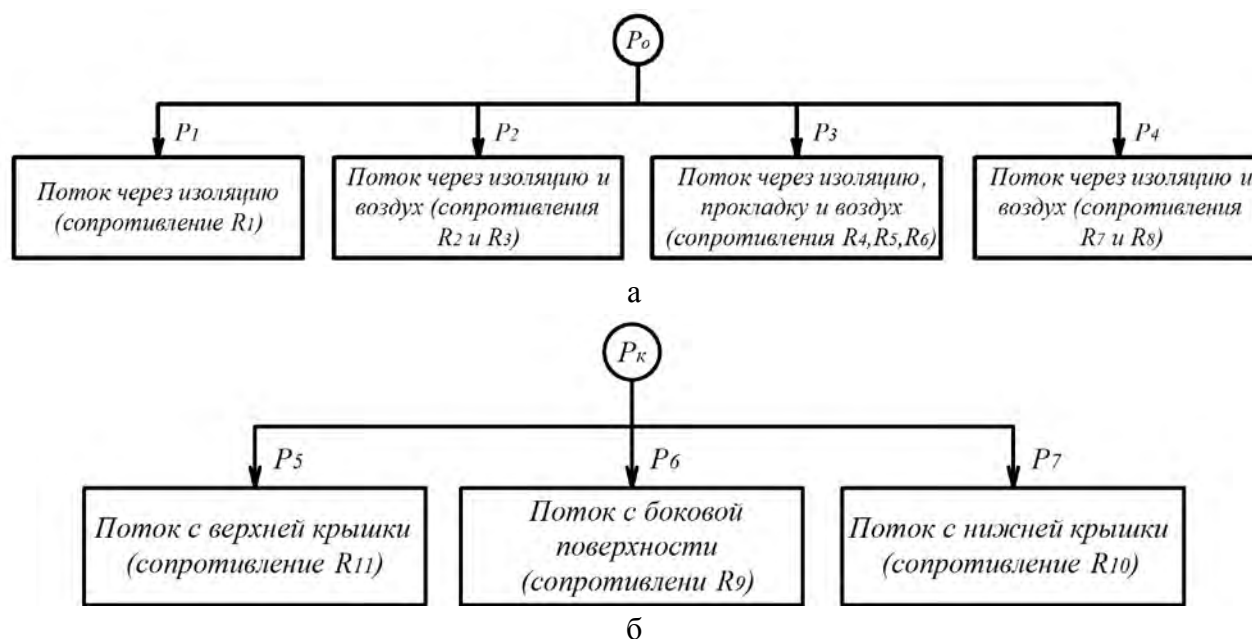


Рисунок 4.2 – Распределение тепловых потоков обмотки (а) и корпуса (б)

В тепловых сопротивлениях, входящих в схему, учтены сопротивления теплопроводности и теплоотдачи [83; 86]. Сопротивление теплопроводности  $R_{mn}$  определяется свойством материала и его размерами:

$$R_{mn} = \frac{\delta}{\lambda S}, \quad (4.8)$$

где  $\delta$  – толщина материала;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала.

Сопротивление теплоотдачи  $R_{mo}$  определяется по выражению:

$$R_{mo} = \frac{1}{\alpha S_o}, \quad (4.9)$$

где  $S_o$  – теплоотдающая поверхность;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Значение  $\alpha$  определяется суммой коэффициентов теплоотдачи излучением  $\alpha_{из}$  и конвекцией  $\alpha_{кон}$ :

$$\alpha = \alpha_{из} + \alpha_{кон}. \quad (4.10)$$

Пренебрегая величиной  $\alpha_{из}$ , которая мала по сравнению с  $\alpha_{кон}$ , определим коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{кон}$ :

$$\alpha_{кон} = k_n \sqrt[4]{\frac{\theta_k - \theta_{oc}}{L}}; \quad (4.11)$$

где  $k_n$  – поправочный коэффициент;  $\theta_k$ ,  $\theta_{oc}$  – температуры корпуса и окружающей среды соответственно;  $L$  – определяющий размер.

Величина  $L$  зависит от формы и расположения в пространстве теплоотдающих поверхностей.

Для определения температур отдельных точек тепловой схемы замещения воспользуемся первым законом Кирхгофа [91]:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0,$$

где  $n$  – число узлов ТСЗ;  $P_i$  – тепловой поток в  $i$ -й ветви.

$$P_{in} = \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{in}} = (\theta_i - \theta_n) g_{in}, \quad (4.12)$$

где  $g_{in}$  – проводимость  $i$ -й ветви;  $\theta_i$ ,  $\theta_n$  – температуры отдельных точек ТСЗ.

Подстановка  $g_{in}$  и  $P_i$  позволяет получить систему линейных алгебраических уравнений, которую удобно представить в виде матричного уравнения:

$$G\Theta = P, \quad (4.13)$$

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

Для определения температур  $\theta_i$  приведем (4.13) к виду

$$\Theta = G^{-1}P, \quad (4.14)$$

где  $G^{-1}$  – матрица, обратная матрице  $G$ .

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 [97].

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в одном из видов:

– для линейных задач:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – осесимметричная конструкция;}$$

– для нелинейных задач:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ – осесимметричная конструкция;}$$

где  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\lambda_{x(y,z,r)}$  – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);  $q$  – удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $c(T)$  – удельная теплоемкость, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры;  $\rho$  – плотность.

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

При анализе результатов расчета температурного поля *Elcut* позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами.

Локальные величины [97]:

– температура  $T$ ;

– вектор плотности теплового потока  $F = -\lambda \text{grad} T$

$$F_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, F_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \text{ – плоская конструкция;}$$

$$F_z = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}, F_r = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \text{ – осесимметричная конструкция.}$$

Интегральные величины:

$$\Phi = \int F \cdot n ds,$$

где  $n$  – единичный вектор нормали к поверхности.

## 4.2 Расчет тепловых процессов ЛЭМД импульсных машин длительного режима работы

Тепловой режим импульсных ЛЭМД машин длительного режима работы, например, формователей колбасных изделий [98], в значительной степени определяется как конструктивными (геометрией и сопротивлением обмотки, величиной охлаждающей поверхности статора), так и режимными (формой импульсов тока, количеством и длительностью импульсов) параметрами. В зависимости от длительности работы подобных машин представляется важным выбор класса изоляции обмотки ЛЭМД.

При рассмотрении процессов нагрева и охлаждения ЛЭМД используем метод конечных элементов [88; 89]. В его основе лежит разбиение объекта исследования на множество элементарных объемов (рисунок 4.3) 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.

Составим уравнение теплопроводности единичного объема  $V_i = h_x \cdot h_y \cdot h_z$  для тепловых потоков:

$$(\zeta_x^+ - \zeta_x^-)h_y h_z \tau + (\zeta_y^+ - \zeta_y^-)h_x h_z \tau + (\zeta_z^+ - \zeta_z^-)h_x h_y \tau = C \Delta T, \quad (4.15)$$

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

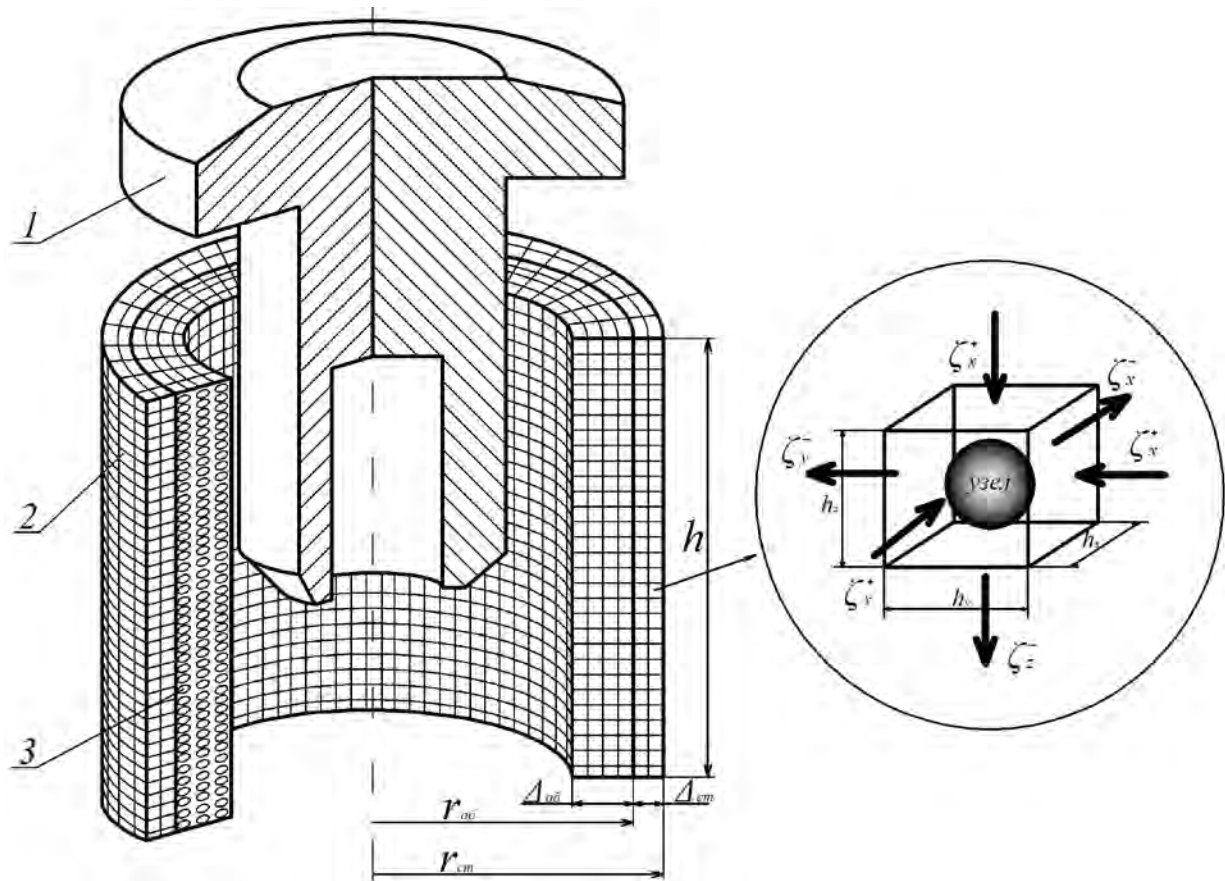


Рисунок 4.3 – Конечно-сеточная модель ЛЭМД

Преобразуем выражение (4.15), 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  $\tau$ :

$$\frac{\zeta_x^+ - \zeta_x^-}{\tau} + \frac{\zeta_y^+ - \zeta_y^-}{\tau} + \frac{\zeta_z^+ - \zeta_z^-}{\tau} + q = C \frac{T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m}{\tau}, \quad (4.16)$$

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

Правая часть уравнения (4.16) представляет собой теплоемкость вещества рассматриваемого элемента и определяет количество теплоты, накапливающейся в единичном объеме  $V_i$  в единицу времени  $\tau_i$  в том месте теплового поля, где расположен рассматриваемый элемент.

Выразим плотность теплового потока  $\zeta$  через температуру в узлах сетки, пользуясь гипотезой о линейности свойств среды [88; 89]. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_x^+ &= \lambda \frac{T_{i+1,j,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_x}; & \zeta_x^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i-1,j,k}^m}{h_x}; \\ \zeta_y^+ &= \lambda \frac{T_{i,j+1,k}^m - T_{i,j,k}^m}{h_y}; & \zeta_y^- &= \lambda \frac{T_{i,j+1,k}^m - T_{i,j-1,k}^m}{h_y}; \\ \zeta_z^+ &= \lambda \frac{T_{i,j,k+1}^m - T_{i,j,k}^m}{h_z}; & \zeta_z^- &= \lambda \frac{T_{i,j,k+1}^m - T_{i,j,k-1}^m}{h_z}, \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества.

При подстановке значений плотностей тепловых потоков  $\zeta$  в уравнения (4.16) получим уравнение Фурье в разностной форме [88; 89].

Для удобства расчетов в уравнение (4.16) введем безразмерный множитель  $\tau/C$  получим:

$$\left. \begin{aligned} H_x^+ &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^+; & H_x^- &= \frac{\tau}{Ch_x} \zeta_x^-; \\ H_y^+ &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^+; & H_y^- &= \frac{\tau}{Ch_y} \zeta_y^-; \\ H_z^+ &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^+; & H_z^- &= \frac{\tau}{Ch_z} \zeta_z^-. \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Тогда после преобразований выражение (4.16) примет вид:

$$\begin{aligned} &A_x[T_{i+1,j,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i-1,j,k}^m] + A_y[T_{i,j+1,k}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j-1,k}^m] + \\ &+ A_z[T_{i,j,k+1}^m + 2T_{i,j,k}^m + T_{i,j,k-1}^m] + Q = \Delta T, \end{aligned} \quad (4.19)$$

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

Определим коэффициент  $A$ , задавшись шагом по времени  $\tau_i$ , 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  $\Delta$  – толщина материала, по которому протекает тепловой поток,  $\Delta_{об}$ ,  $\Delta_{см}$  – толщина обмотки 3 и статора 2 соответственно (рисунок 4.4).

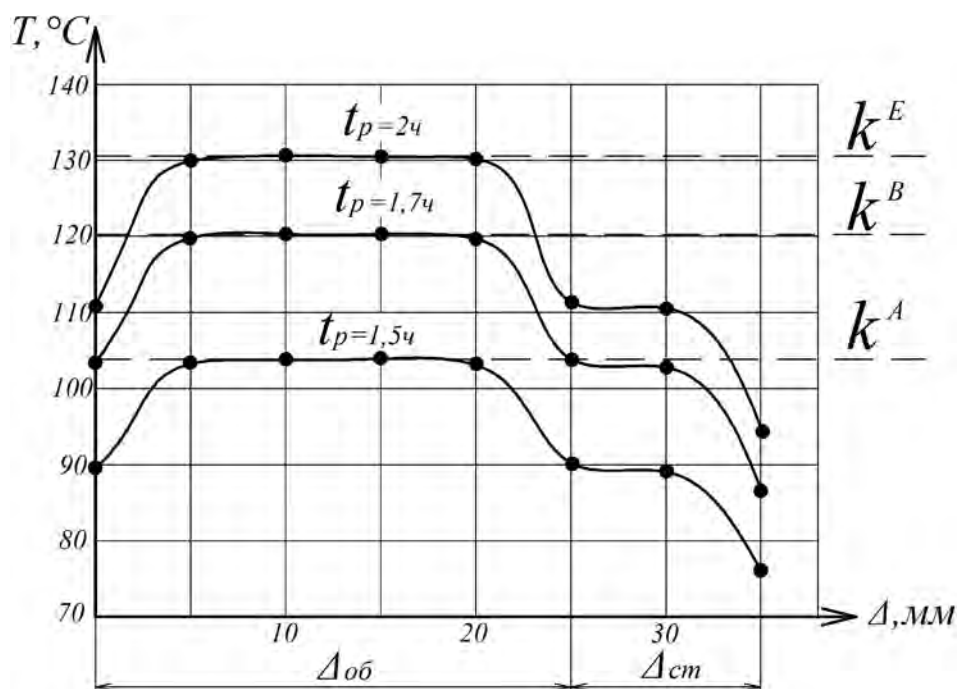


Рисунок 4.4 – Изменение температуры в зависимости от времени работы и толщины

Поскольку  $k^A \approx 1,12k^B \approx 1,25k^E$ , переход с класса нагревостойкости 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  $A$ .

### 4.3 Определение стационарного температурного поля ЛЭМД

Проектирование ЛЭМД импульсных машин требует полного и точного определения 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 [90; 91]. Тепловая схема замещения ЛЭМД (рисунок 4.1 б) составлена на основе конструктивной схемы (рисунок 4.1 а) и учитывает потери энергии в обмотке  $P_o$  и корпусе  $P_k$  двигателя, тепловые сопротивления изоляции обмотки, паразитных зазоров, воздушных промежутков между статором и обмоткой и т.д. Так как тепловой режим ЛЭМД близок к стационарному, то теплопередачей в сторону якоря можно пренебречь  $P_4=const$ , и  $R_7, R_8, \theta_5$  в расчетах не учитываются. Расчеты тепловых сопротивлений изоляции обмотки показали, что  $R_1=R_4$ . Таким образом, температуры на нижней 4 и верхней 6 торцевых поверхностях (рисунок 4.1 а) одинаковы и равны  $\theta_2$ , 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 [81]:

$$R = 1/\alpha S. \quad (4.20)$$

Тогда с учетом упрощений тепловая схема замещения на рисунке 4.1 б примет вид (рисунок 4.5).

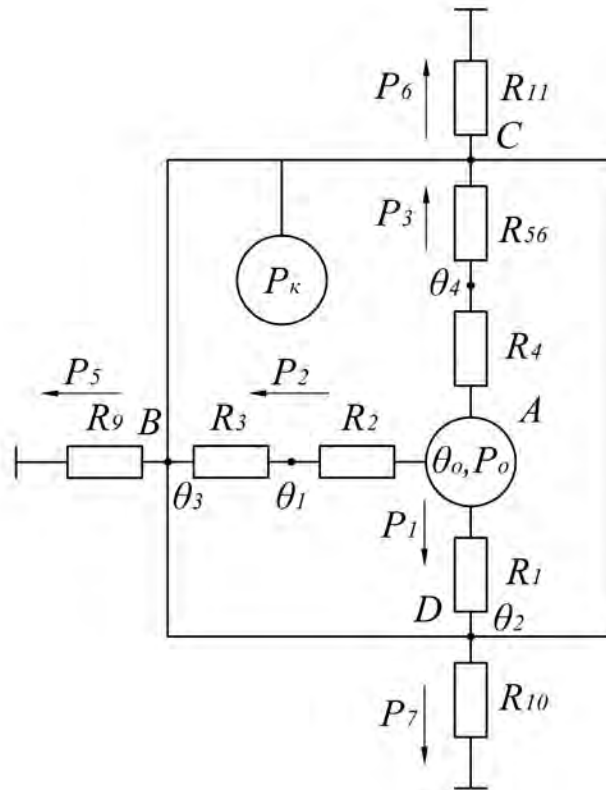


Рисунок 4.5 – Упрощенная тепловая схема замещения ЛЭМД

По первому закону Кирхгофа для схемы (рисунок 4.5) запишем

$$\left. \begin{aligned} m. A - P_0 &= P_1 + P_2 + P_3 = 2P_1 + P_2; \\ m. B - P_5 &= P_k + P_2; \\ m. C - P_6 &= P_k + P_3; \\ m. D - P_7 &= P_k + P_1. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Составим систему линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2 \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_0 - \theta_1}{R_2}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_3} &= \frac{\theta_3 - \theta_{окр}}{R_9}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_2 - \theta_4}{R_{56}} &= \frac{\theta_4 - \theta_{окр}}{R_{10}}; \\ P_\kappa + \frac{\theta_0 - \theta_2}{R_1} &= \frac{\theta_2 - \theta_{окр}}{R_{11}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Выражая проводимость  $g=1/R$ , приведем систему (4.22) к виду

$$\left. \begin{aligned} P_o &= 2\theta_0 g_1 - 2\theta_2 g_1 + \theta_0 g_2 - \theta_1 g_2; \\ P_\kappa + \theta_1 g_3 - \theta_2 g_3 &= \theta_3 g_9 - \theta_{окр} g_9; \\ P_\kappa + \theta_2 g_{56} - \theta_4 g_{56} &= \theta_4 g_{10} - \theta_{окр} g_{10}; \\ P_\kappa + \theta_0 g_1 - \theta_2 g_1 &= \theta_2 g_{11} - \theta_{окр} g_{11} \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

или

$$\left. \begin{aligned} g_2 \theta_1 + 2g_1 \theta_2 &= (2g_1 + g_2) \theta_0 - P_o; \\ -g_3 \theta_1 + (g_9 + g_3) \theta_3 &= P_\kappa + g_9 \theta_{окр}; \\ -g_{56} \theta_2 + (g_{10} + g_{56}) \theta_4 &= P_\kappa + g_{10} \theta_{окр}; \\ (g_{11} + g_1) \theta_2 &= P_\kappa + g_{11} \theta_{окр} + g_1 \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Представим систему уравнений (4.24) в матричной форме

$$G\Theta = P, \quad (4.25)$$

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

$$G = \begin{pmatrix} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4.26)$$

$P=(P_i)$  – матрица тепловых потоков

$$P = \begin{pmatrix} (2g_1 + g_2) \theta_0 - P_o \\ P_\kappa + g_9 \theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{10} \theta_{окр} \\ P_\kappa + g_{11} \theta_{окр} + g_1 \theta_0 \end{pmatrix}; \quad (4.27)$$

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

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix}. \quad (4.28)$$

Для оценки возможности решения системы уравнений (4.23) воспользуемся методом Гаусса [92]. Вычислим определитель  $\Delta_G$  матрицы (4.26)

$$\begin{aligned} \Delta_G &= \begin{vmatrix} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \\ &= (g_{11} + g_1) \begin{vmatrix} g_2 & 0 & 0 \\ -g_3 & g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & 0 & g_{10} + g_{56} \end{vmatrix} = \\ &= g_2(g_{11} + g_1) \begin{vmatrix} g_9 + g_3 & 0 \\ 0 & g_{10} + g_{56} \end{vmatrix} = \\ &= g_2(g_{11} + g_1)(g_9 + g_3)(g_{10} + g_{56}). \end{aligned} \quad (4.29)$$

Положительное значение  $\Delta_G$  свидетельствует о существовании решения системы (4.29).

Докажем единственность решения системы уравнений (4.23) по теореме Кронекера-Капелли. Для этого представим (4.23) в виде расширенной матрицы  $G^*$

$$G^* = \left( \begin{array}{cccc|c} g_2 & +2g_1 & 0 & 0 & (2g_1 + g_2)\theta_0 - P_o \\ -g_3 & 0 & g_9 + g_3 & 0 & P_\kappa + g_9\theta_{окр} \\ 0 & -g_{56} & 0 & g_{10} + g_{56} & P_\kappa + g_{10}\theta_{окр} \\ 0 & g_{11} + g_1 & 0 & 0 & P_\kappa + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0 \end{array} \right). \quad (4.30)$$

Так как ранги матриц  $G$  и  $G^*$  совпадают с числом неизвестных, то есть  $\text{rang}G = \text{rang}G^* = 4$ , то система уравнений (4.23) имеет единственное решение [11].

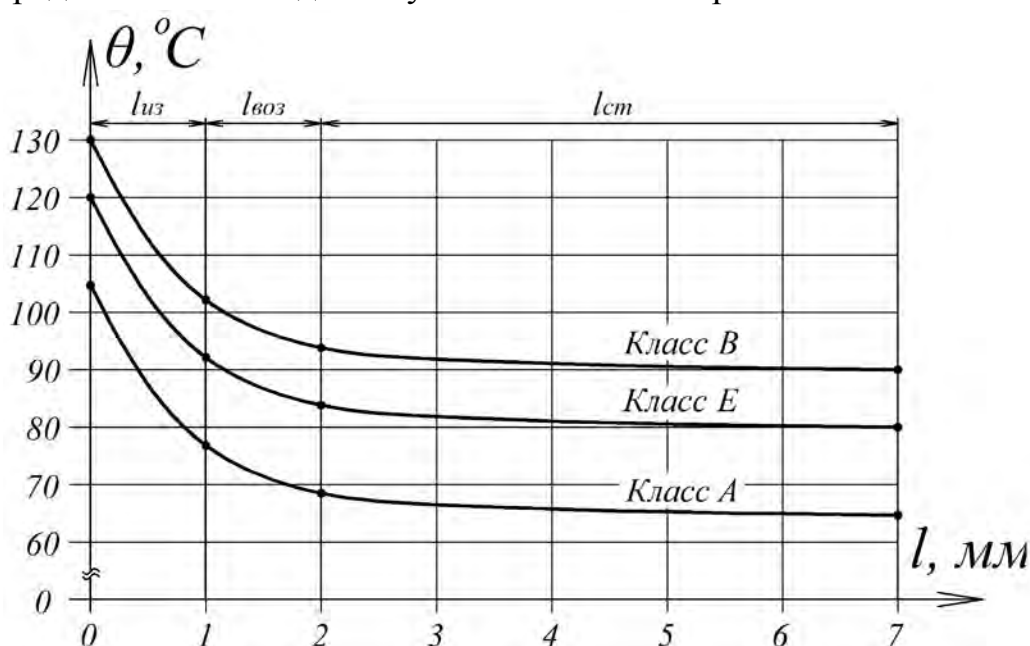
Для определения значений температур  $\theta_1 - \theta_4$  решим матричное уравнение (4.25) методом Гаусса. Введем обозначения

$$\left. \begin{aligned} A &= P_\kappa + g_{11}\theta_{окр} + g_1\theta_0; \\ a &= g_{11} + g_1, \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{(2g_1 + g_2)\theta_o a - 2Ag_1 - aP_o}{ag_2}; \\ \theta_2 &= \frac{A}{a}; \\ \theta_3 &= \frac{ag_2 P_k + ag_9 g_2 \theta_{окр} + g_3 [(2g_1 + g_2)\theta_o a - aP_o - 2Ag_1]}{ag_2 (g_9 + g_3)}; \\ \theta_4 &= \frac{a(P_k + g_{10} \theta_{окр}) + g_{56} A}{a(g_{10} + g_{56})}. \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

В качестве примера на рисунке 4.6 представлены кривые распределения температур для элементов ЛЭМД переносной ударной машины [64], построенные по предлагаемой методике с учетом классов нагревостойкости изоляции.



$l_{из}$  – толщина изоляции;  $l_{воз}$  – воздушный зазор;  $l_{ст}$  – толщина статора

Рисунок 4.6 – Распределение температур для элементов ЛЭМД

Кривые (рисунок 4.6) позволяют определить зоны наибольшего нагрева машины и сформулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию систем принудительного охлаждения импульсных машин с линейными электромагнитными двигателями.

#### 4.4 Влияние контактирующих поверхностей обмотки и статора на тепловой поток в ЛЭМД

Тепловой режим ЛЭМД определяется большим количеством факторов, основными из которых являются параметры питающих импульсов, частота ходов якоря, свойства обмотки, особенности её монтажа и крепления в расточке статора

(корпуса), определяющие 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.

При определении значения  $Q$  будем полагать режим передачи тепла близким к стационарному, температуру поверхности обмоточного провода  $\theta_{обм}$  и статора  $\theta_{ст}$  ЛЭМД известной и меняющейся лишь в радиальном направлении  $x$  при  $\theta_{обм} > \theta_{ст}$ ; температурное поле будем считать одномерным, а изотермические поверхности – цилиндрическими.

На рисунке 4.7 представлена часть корпуса ЛЭМД – статор 1 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$ , внутренним  $r_2$  и внешним  $r_3$  радиусами и обмоткой 2 высотой  $h$  и внешним радиусом  $r_1$ . Полагая плотное прилегание обмотки 2 к статору 1 и толщину изоляции  $\Delta_{из}$  провода обмотки с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1$ , будем считать систему двухслойной.

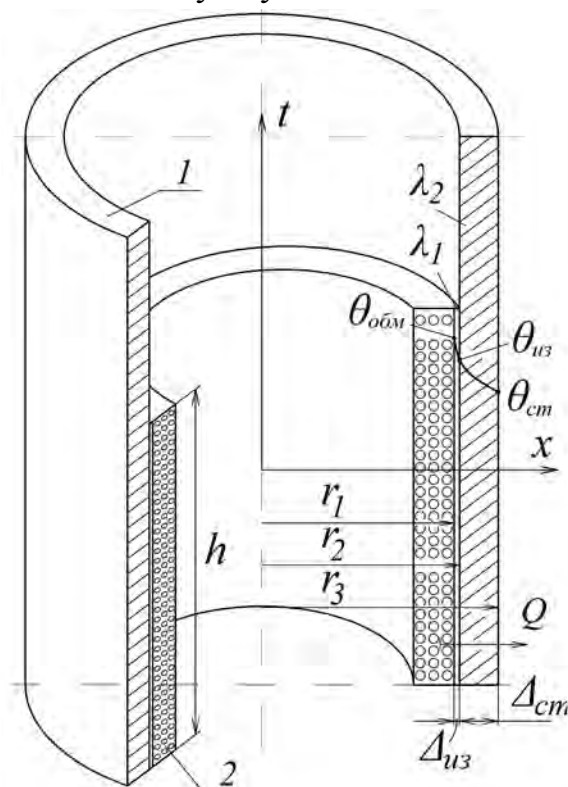


Рисунок 4.7 – Эскиз корпуса ЛЭМД без воздушных зазоров

При стационарном режиме количества тепла  $Q$ , проходящего через слой изоляции  $\Delta_{из}$  и статора  $\Delta_{ст}$ , одинаково и постоянно, поэтому согласно [87]

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{обм} - \theta_{из})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}; \\ Q &= \frac{2\pi h \cdot (\theta_{из} - \theta_{ст})}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}, \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

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

Из уравнений (4.33) определим изменение температуры в изоляции  $\Delta\theta_{из} = \theta_{обм} - \theta_{из}$  и статоре  $\Delta\theta_{ст} = \theta_{из} - \theta_{ст}$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{из} &= \theta_{обм} - \theta_{из} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}; \\ \Delta\theta_{ст} &= \theta_{из} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h \lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

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

$$\Delta\theta_{полн} = \Delta\theta_{из} + \Delta\theta_{ст} = \theta_{обм} - \theta_{ст} = \frac{Q}{2\pi h} \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right). \quad (4.35)$$

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

$$Q = \frac{2\pi h \cdot \Delta\theta_{полн}}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}}. \quad (4.36)$$

Выражение (4.36) адекватно характеризует значение  $Q$  при условии плотного контакта обмотки 2 и статора 1 (рисунок 4.7). Однако на практике вследствие шероховатости прилегающих поверхностей между слоями образуются воздушные зазоры, значительно уменьшающие полный тепловой поток  $Q$ . Аналогичное влияние оказывает и оксидная пленка на статоре 1.

На рисунке 4.8 представлена многослойная стенка корпуса ЛЭМД с учетом толщины окисной пленки и воздушных зазоров между обмоткой 2 и статором 1. По аналогии с (4.33)-(4.36) представим выражение для определения полного теплового потока  $Q$  для  $n$ -слойной стенки цилиндрического линейного электромагнитного двигателя [87]:

$$Q = \frac{2\pi h(\theta_1 - \theta_n)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (4.37)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопередачи  $i$ -го слоя;  $r_i$  – радиус  $i$ -го слоя.

Для визуализации зависимости полного теплового потока от приращения температуры  $\Delta\theta_{полн}$  для различных значений  $r_{n-1}/r_2$  на рисунке 4.9 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  $\lambda_в=0,02$  ( $r_{n-1}/r_2 = 1,02$ ) снижает полный тепловой поток на 50 % по сравнению с идеальной двухслойной стенкой магнитопровода.

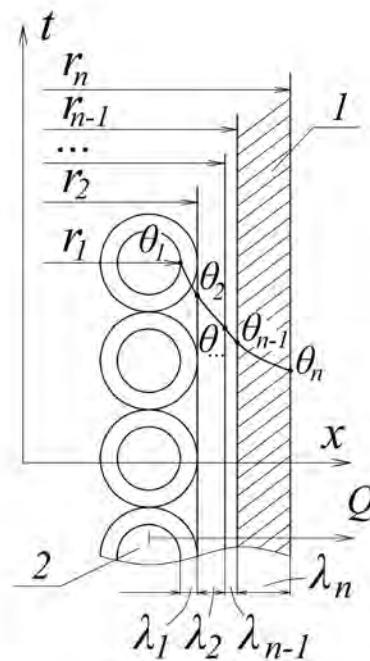


Рисунок 4.8 – Эскиз корпуса ЛЭМД с учетом воздушных зазоров и окисла металла статора

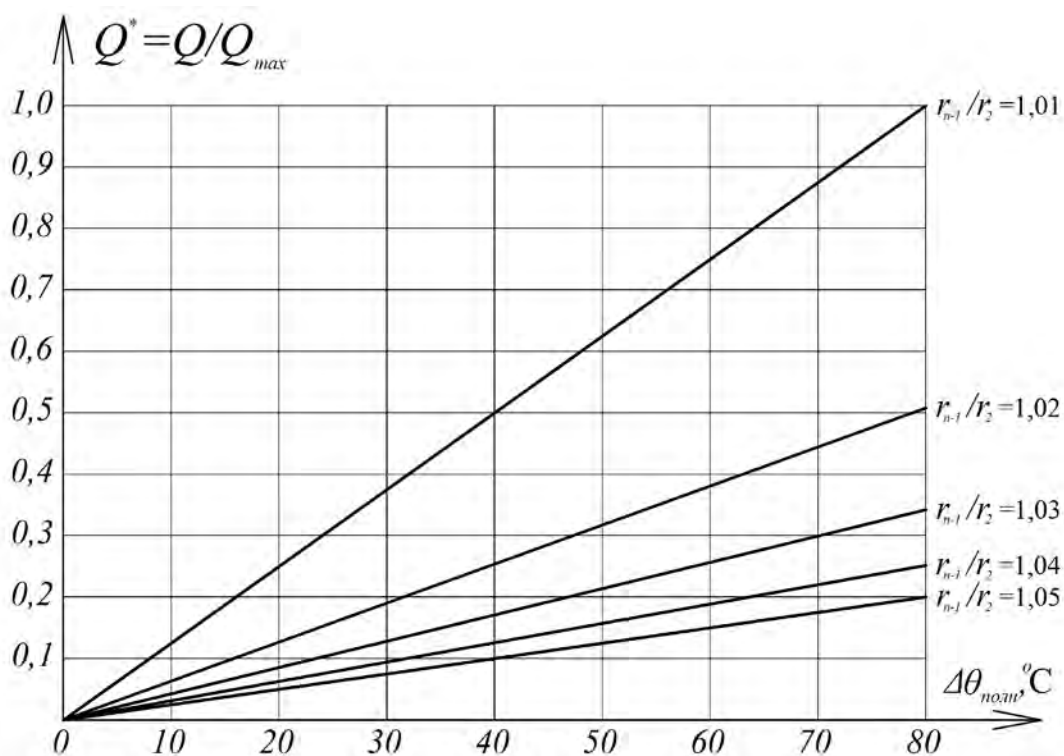


Рисунок 4.9 – Диаграмма зависимости относительного теплового потока  $Q^*$  от изменения температуры  $\Delta\theta_{\text{полн}}$

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, снижает тепловой поток  $Q$  и увеличивает температуру обмотки. В этом случае при естественном охлаждении машины монтажу обмотки должно предшествовать удаление окисной пленки на статоре, а для улучшения теплового контакта целесообразно применять кремнийорганические теплопроводные пасты, например, СИЛОТЕРМ ЭП, *SILARM* и др.

Для форсированных импульсных 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.

#### 4.5 Способы интенсификации охлаждения ЛЭМД импульсных машин

В зависимости от назначения и вида технологической операции ЛЭМД могут отличаться по конструкции, габаритам и по режимам питания, а основными выходными показателями принято считать энергию  $A_{\text{уд}}$  и частоту  $n$  ударов для прессов и ударных машин [30; 94], начальное  $F_{\text{н}}$  или конечное  $F_{\text{к}}$  тяговые усилия

для тросошайбовых транспортеров или формователей колбасных изделий [93] и клипсаторов, соответственно.

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

Способы интенсификации процесса охлаждения электромагнитных двигателей целесообразно классифицировать по характерным признакам (рисунок 4.10):

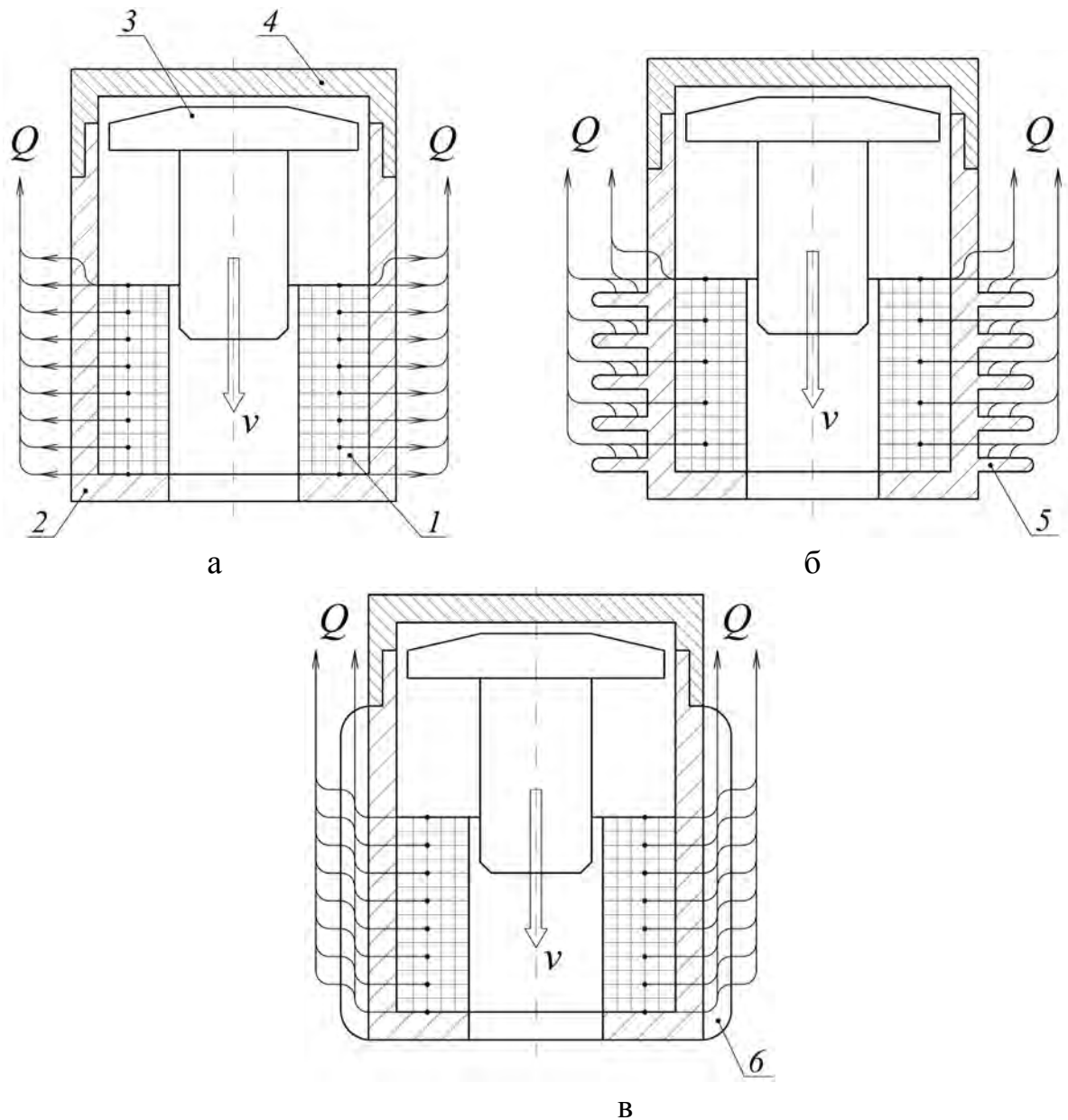
- с естественным охлаждением (рисунок 4.11 а-в), – не имеющие специальных вентиляторов;
- с искусственным охлаждением за счет вытяжной или нагнетательной вентиляции (рисунок 4.12 а-в), в которых движение охлаждающего нагретые части воздуха обеспечивается искусственно, например, с помощью вентилятора.



Рисунок 4.10 – Классификация способов интенсификации охлаждения ЛЭМД

Для ЛЭМД импульсных машин кратковременного режима, например, сводообрушителей, превышение температуры токоведущих частей незначительно  $\theta_{об} \geq \theta_{окр}$ , и дополнительных мероприятий по интенсификации охлаждения не требуется. В этом случае теплоотдача будет протекать через гладкую боковую поверхность корпуса ЛЭМД (рисунок 4.11 а).

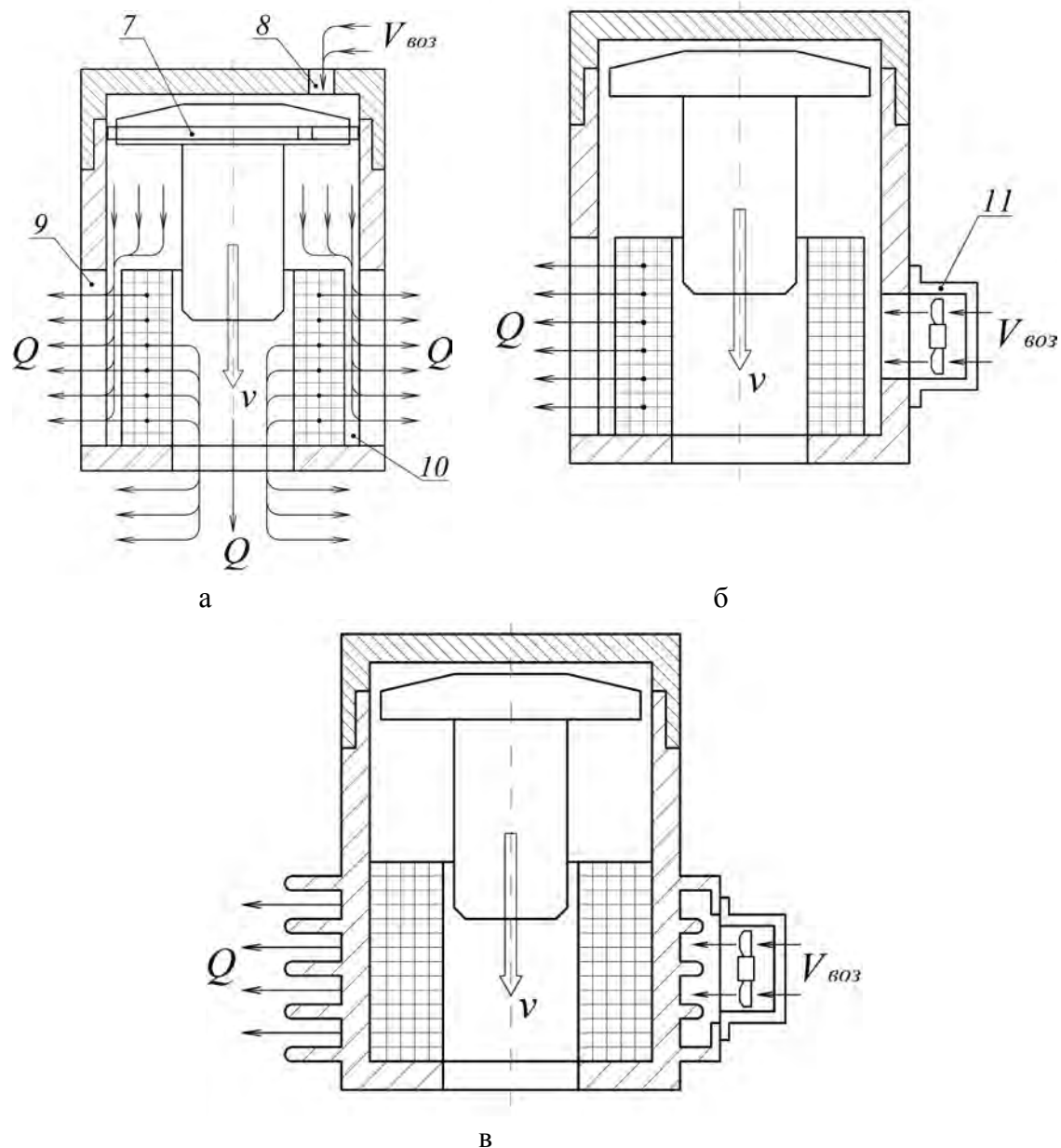
Для повышения надежности ЛЭМД при работе в повторно-кратковременном режиме, когда  $\theta_{об} \geq \theta_{об}^{доп}$ , необходимо увеличить его поверхность охлаждения. Оребрение корпуса двигателя производится с целью интенсификации процесса теплопередачи. Различают ЛЭМД с радиальным 5 (рисунок 4.11 б) и осевым 6 (рисунок 4.11 в) расположением охлаждающих ребер.



1 – обмотка; 2 – статор; 3 – комбинированный якорь; 4 – крышка;  
5 – радиальные ребра охлаждения; 6 – осевые ребра охлаждения

Рисунок 4.11 – Линейные электромагнитные двигатели с естественным охлаждением: ЛЭМД с гладкой охлаждающей поверхностью (а); ЛЭМД с радиальным (б) и осевым (в) расположением охлаждающих ребер

Для количественной оценки увеличения площади ребристой поверхности используется коэффициент оребрения  $k_F = F_{op} / F_{gl}$ , где  $F_{op}$  и  $F_{gl}$  – соответственно площадь оребренной и гладкой поверхностей.



7 – компрессионное кольцо; 8 – вентиляционное отверстие; 9 – аксиальные вентиляционные пазы; 10 – зазор между обмоткой и статором;  
11 – вентилятор

Рисунок 4.12 – Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением: с самовентиляцией (а); продуваемый (б) и обдуваемый (в)

При создании и совершенствовании импульсных электромагнитных машин с жесткими требованиями по минимизации массы устройства, например, для переносных ударных приводов, представляется эффективным увеличение охлаждающей поверхности ЛЭМД путем его оребрения. При этом значение величины  $k_F$

должно находиться в пределах до  $k_F = 2,5$ . Увеличение коэффициента оребрения в диапазоне  $k_F = 2,5 \dots 4,0$  приводит к снижению относительных удельных потерь не более чем на 15% и представляет интерес для стационарных импульсных электромагнитных машин, в частности, для формователей колбасных изделий. Дальнейшее увеличение коэффициента  $k_F = 4,0 \dots 5,5$  представляется нецелесообразным ввиду значительного увеличения металлоемкости всего электропривода.

Линейные электромагнитные двигатели с искусственным охлаждением могут подразделяться на ЛЭМД с самовентиляцией (рисунок 4.12 а) и независимой вентиляцией, вентилятор которых приводится во вращение вспомогательным двигателем (рисунок 4.12 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.

В зависимости от направления движения охлаждающего воздуха относительно обмотки двигателя различают ЛЭМД с аксиальной (рисунок 4.12а), аксиально-радиальной и радиальной (рисунок 4.12 б,в) вентиляцией.

В зависимости от того, какие части в электромагнитном двигателе с искусственным охлаждением обдуваются воздухом, различают продуваемые (рисунок 4.12 а,б) и обдуваемые (рисунок 4.12 в) ЛЭМД. К первому типу относятся ЛЭМД, в которых 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.

Таким образом, при проектировании и создании импульсных машин с ЛЭМД с учетом режимов работы представляется важным выбор способа интенсификации охлаждения.

#### **4.6 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с развитой теплоотдающей поверхностью**

Важным фактором, влияющим на теплопередачу, является величина охлаждающей поверхности корпуса двигателя [83; 86].

Оребрение поверхности корпуса ЛЭМД производится с целью интенсификации процесса теплопередачи. При этом в задачу расчета оребрения входит распределение температуры по ребру, количества снимаемого тепла, вес и стоимость оребренной поверхности охлаждения. Кроме того, к ребристым поверхностям корпуса двигателя предъявляется ряд дополнительных требований: минимализация их габаритных размеров и веса, эффективное использование материа-

лов и др. В полном объеме такая задача может быть разрешена только на основе эксперимента [83; 86].

При сравнительной оценке ребристой поверхности будем использовать коэффициент оребрения  $k_F$  [83; 86]

$$k_F = \frac{F_{op}}{F_{\text{гл}}}, \quad (4.38)$$

где  $F_{op}$  и  $F_{\text{гл}}$  – 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  $F_{охл}$ :

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{\Delta P}{F_{охл}}, \quad (4.39)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в обмотке.

$$\Delta P = I^2 R, \quad (4.40)$$

где  $I$  – ток в обмотке рабочего хода якоря;  $R$  – сопротивление обмотки.

Для определения значений  $\Delta P$  воспользуемся, в частном случае, осциллограммами тока  $i(t)$ , напряжения  $u(t)$  и перемещения  $\delta(t)$  якоря за один рабочий ход (рисунок 4.13) [94].

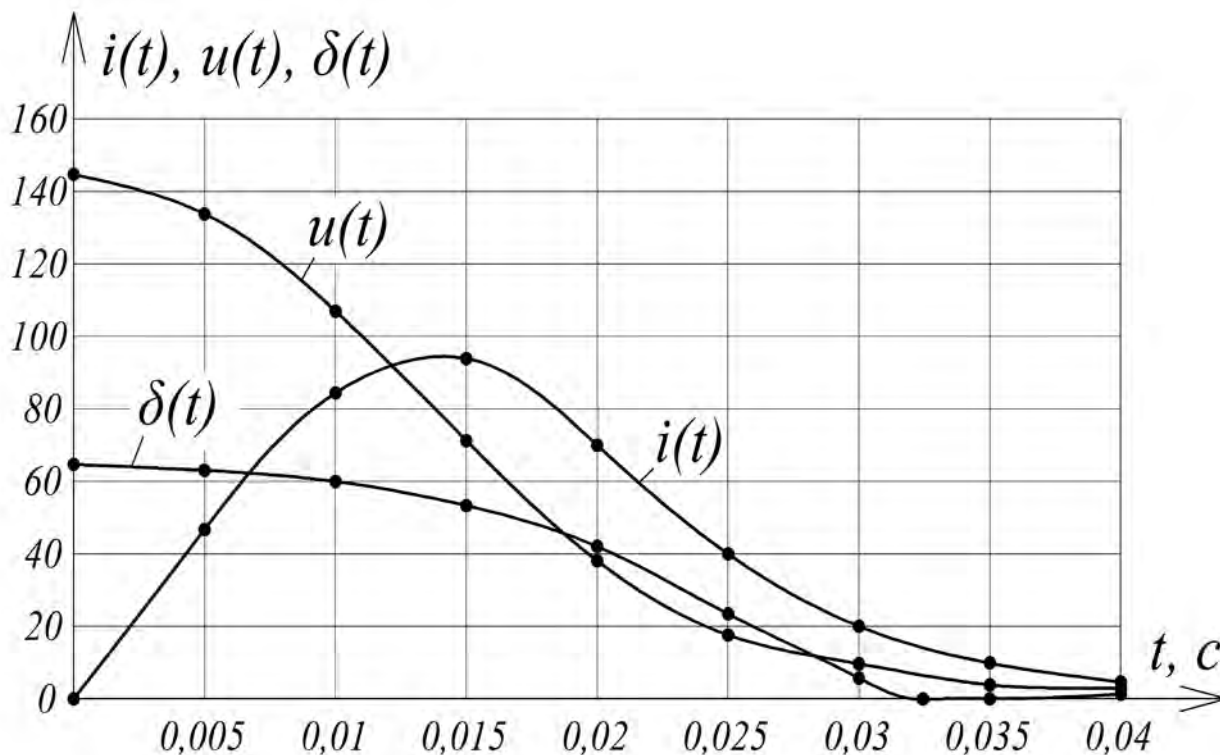


Рисунок 4.13 – Динамические характеристики ЛЭМД ударной машины

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

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt}, \quad (4.41)$$

где  $t_{px}$  – время рабочего хода.

С учетом (4.41) выражение (4.40) преобразуется к виду

$$\Delta P = R \left( \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt} \right)^2. \quad (4.42)$$

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

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{R \left( \sqrt{\frac{1}{t_{px}} \int_0^{t_{px}} i^2(t) dt} \right)^2}{F_{охл}}. \quad (4.43)$$

При дискретном поступлении однополярных импульсов тока в обмотку ЛЭМД ее нагрев происходит только на интервале рабочего хода  $t_{px}$ . Поскольку интервал холостого хода  $t_{xx}$  якоря, когда ток в двигателе равен  $i=0$ , 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  $P^* = f(k_F)$  (рисунок 4.14).

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

$$\left. \begin{aligned} I - k_F &= 1,0 \dots 2,5; \\ II - k_F &= 2,5 \dots 4,0; \\ III - k_F &= 4,0 \dots 5,5, \end{aligned} \right\} \quad k_{cp} = \frac{\sum k_i}{i}, \quad (4.44)$$

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

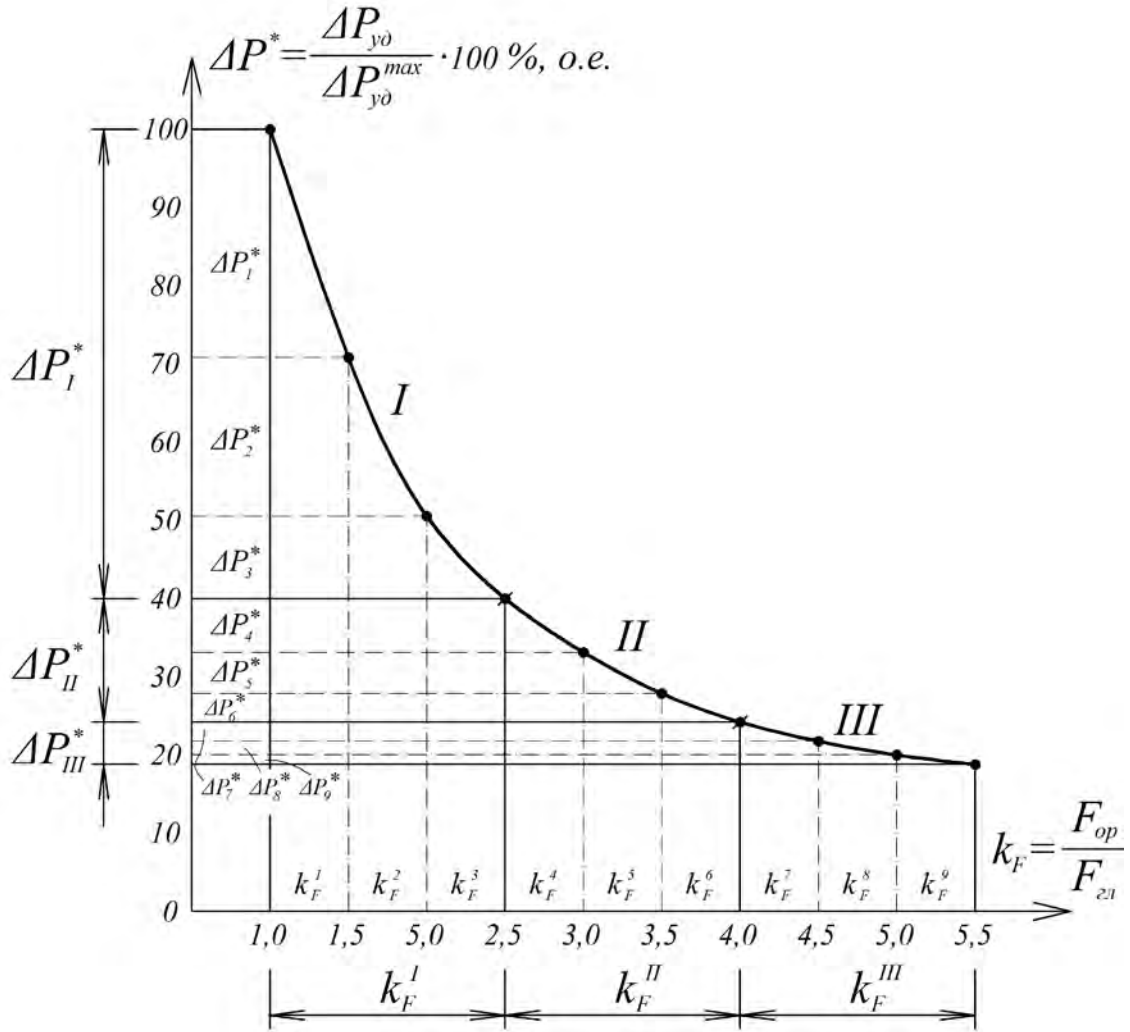


Рисунок 4.14 – Зависимость относительных удельных потерь  $\Delta P^*$  от величины коэффициента оребрения  $k_F$

$$\left. \begin{aligned} k_{cp}^I &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_1^*}{\Delta k_F^1} + \frac{\Delta P_2^*}{\Delta k_F^2} + \frac{\Delta P_3^*}{\Delta k_F^3} \right); \\ k_{cp}^{II} &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_4^*}{\Delta k_F^4} + \frac{\Delta P_5^*}{\Delta k_F^5} + \frac{\Delta P_6^*}{\Delta k_F^6} \right); \\ k_{cp}^{III} &= \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_7^*}{\Delta k_F^7} + \frac{\Delta P_8^*}{\Delta k_F^8} + \frac{\Delta P_9^*}{\Delta k_F^9} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

где  $k_{cp}^I$ ,  $k_{cp}^{II}$ ,  $k_{cp}^{III}$  – коэффициенты передачи соответственно *I*, *II* и *III* участков,  $\Delta k_F$  – приращение коэффициента оребрения;  $\Delta P^*$  – приращение относительных удельных потерь.

С учетом (4.45) имеем

$$k_{cp}^I \approx 3,64k_{cp}^{II} \approx 8k_{cp}^{III}. \quad (4.46)$$

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 импульсных электромагнитных машин.

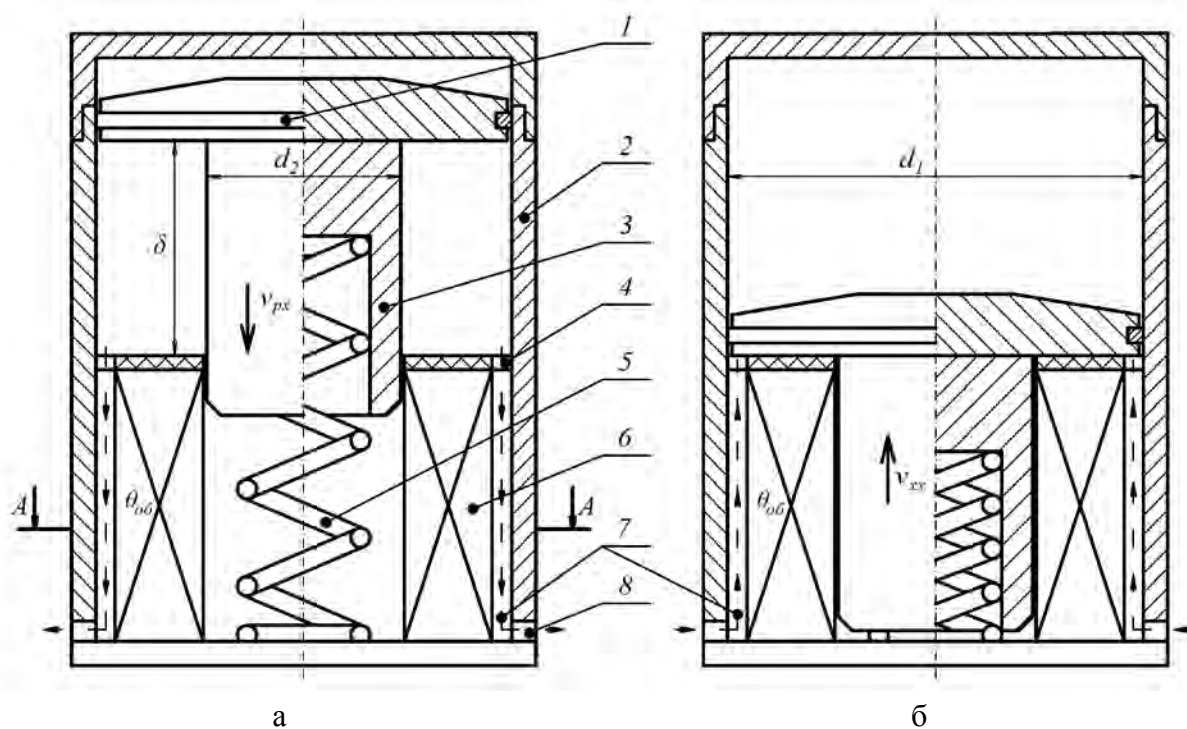
Дальнейшее повышение  $k_F = 4,0 \dots 5,5$  представляется нецелесообразным ввиду значительного увеличения металлоемкости всего электропривода.

#### 4.7 Оценка тепловых процессов в ЛЭМД с искусственным охлаждением

Использование ЛЭМД в импульсных машинах с интенсивным потреблением электроэнергии, например, для погружения металлических стержней в грунт, представляется эффективным [50]. При этом повышенное значение ударной мощности таких машин обеспечивается при условии форсированного потребления энергии от аккумуляторов или емкостных накопителей [50]. 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 импульсных ЛЭМД с естественным охлаждением частотударных машин с продолжительным режимом работы. Таким образом, интенсификация процесса охлаждения ЛЭМД представляется важной.

На рисунке 4.15 показана конструктивная схема ЛЭМД с самовентиляцией, особенностью которого является непосредственное охлаждение окружающим воздухом токоведущих частей двигателя (обмотки) через вентиляционные каналы [99].

При подключении обмотки 6 к источнику питания якорь 3, под действием электромагнитной силы совершает рабочий ход (рисунок 4.15 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 (рисунок 4.15 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.



*а – рабочий ход; б – холостой ход*

*Рисунок 4.15 – Конструктивные схемы ЛЭМД с самовентилиацией*

Важным для теплового расчета ЛЭМД является определение в зоне охлаждающего канала коэффициента теплоотдачи, расчет которого производится по рекомендациям [87]:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}, \quad (4.47)$$

где  $\lambda$  – 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 [87]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}, \quad (4.48)$$

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

В расчетах будем использовать гидравлический или эквивалентный диаметр сечения  $d_3$ , определяемый следующим образом [95]:

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi}, \quad (4.49)$$

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

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

$a$  – глубина паза, м;  $b$  – ширина паза по дуге, м;  $d_{cm}$  – внутренний диаметр статора (рисунок 4.16).

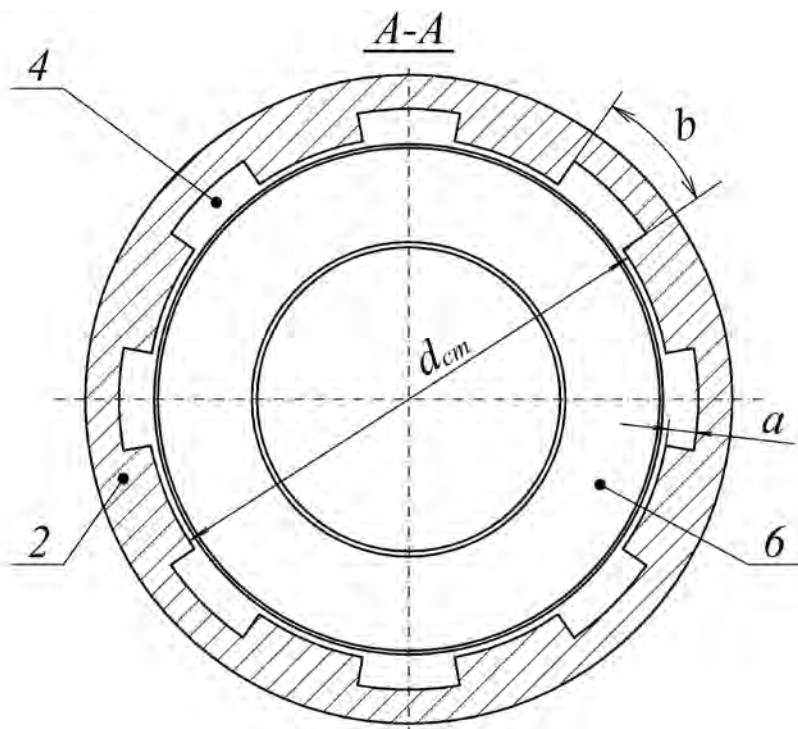


Рисунок 4.16 – Сечение ЛЭМД с охлаждающими каналами

При рассмотрении течений охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах воспользуемся величиной средней расходной скорости  $v_{в.ср}$  [95], определяемой как отношение объемного расхода воздуха  $Q_v$  к площади поперечного сечения канала  $S$ :

$$v_{в.ср} = \frac{Q_v}{S}. \quad (4.50)$$

Объёмный расход  $Q_v$  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, отнесенному ко времени соответственно рабочего  $t_{px}$  и холостого хода  $t_{xx}$  якоря 3. При этом утечкой воздуха через компрессионное кольцо 1 можно пренебречь.

$$Q_v^{px} = \frac{\pi \delta}{4t_{px}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (4.51)$$

$$Q_{\delta}^{xx} = \frac{\pi \delta}{4 t_{xx}} (d_1^2 - d_2^2); \quad (4.52)$$

где  $Q_{\delta}^{px}$ ,  $Q_{\delta}^{xx}$  – объемный расход воздуха при рабочем и холостом ходе соответственно, м<sup>3</sup>/с;  $\delta$  – величина рабочего хода якоря, м;  $d_1$  – внутренний диаметр статора в надобмоточном пространстве, м;  $d_2$  – диаметр якоря, м.

Таким образом, с учетом (4.48)-(4.51) и (4.52) выражение (4.47) примет вид:

$$\alpha_{px} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left( \frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left( \frac{\delta(d_1^2 - d_2^2)}{t_{px} v} \right)^{0,8} \cdot \left( 2a + b \left( 1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (4.53)$$

$$\alpha_{xx} = 0,0045 \pi^{-0,2} \frac{\lambda \left( \frac{d_{cm}}{a} + 2 \right)}{b(d_{cm} + a)} \left( \frac{\delta(d_1^2 - d_2^2)}{t_{xx} v} \right)^{0,8} \cdot \left( 2a + b \left( 1 + \frac{1}{1 + 2a} \right) \right)^{0,2}; \quad (4.54)$$

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

Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи ЛЭМД при рабочем  $\alpha_{px}$  и холостом  $\alpha_{xx}$  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 рисунке 4.17.

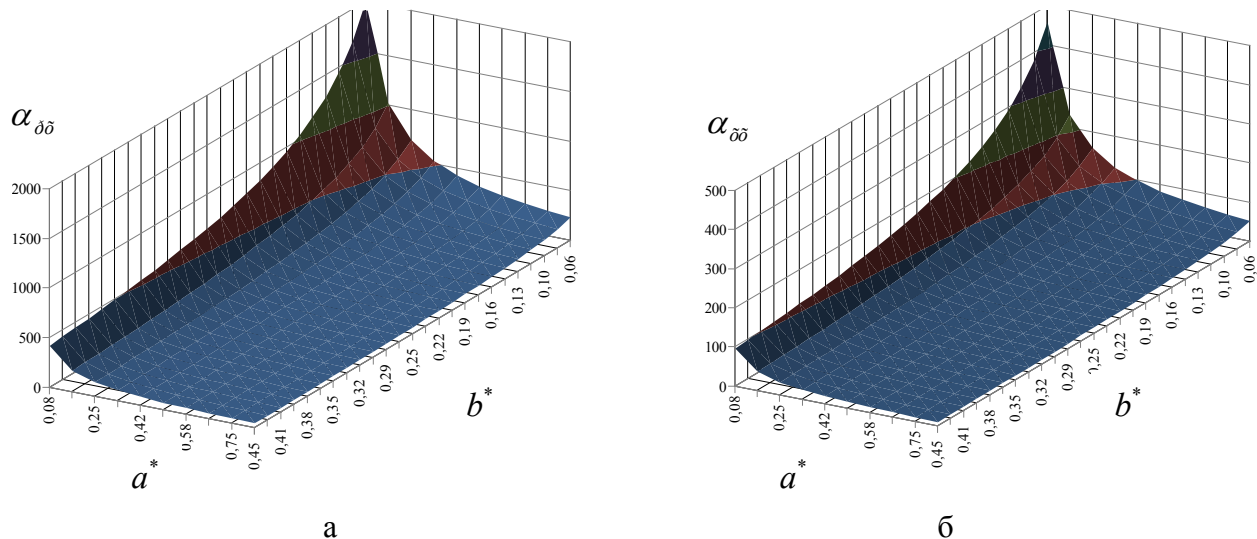


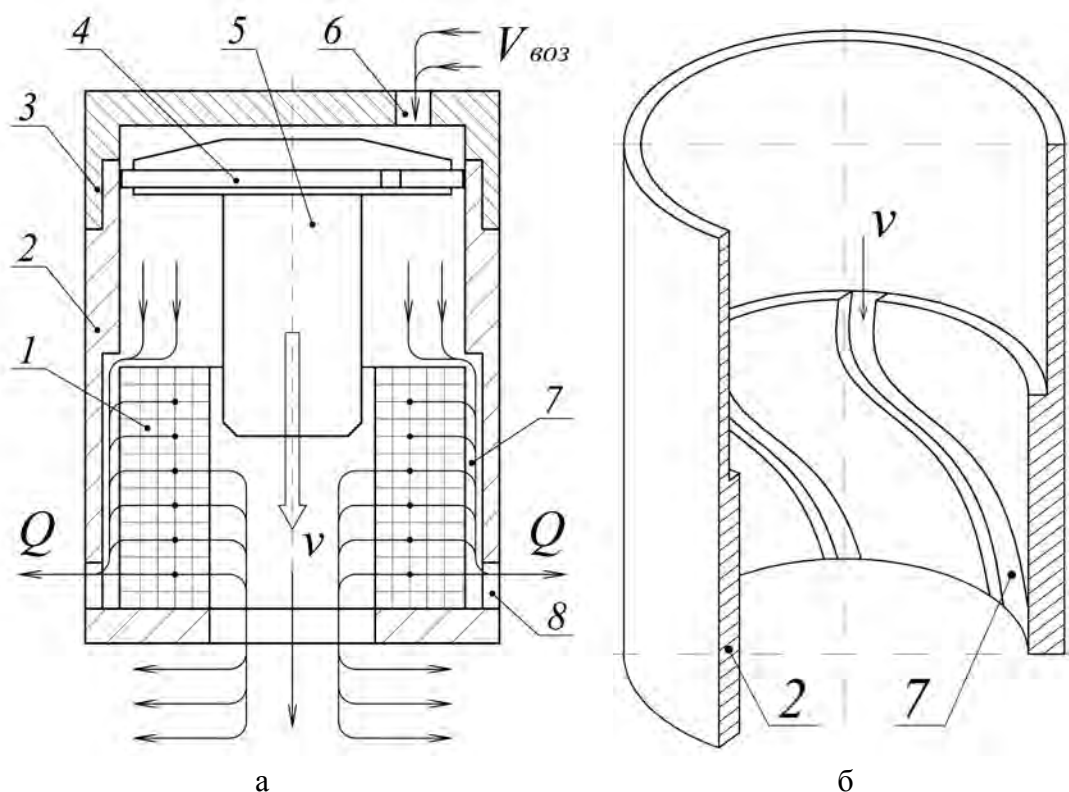
Рисунок 4.17 – Поверхности отклика значений коэффициентов теплоотдачи от геометрических факторов: при рабочем (а) и холостом (б) ходе якоря

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{px}$  при рабочем ходе якоря ЛЭМД составляет  $\alpha_{px} \approx 20 \alpha_{xx}$ , что объясняется движением якоря со скоростью  $v_{px} > v_{xx}$  и более ин-

тенсивным прохождением воздуха через вентиляционные каналы. Наибольшие значения  $\alpha_{px}$  и  $\alpha_{\partial\partial}$  достигаются при  $a^* < 0,17$  и  $b^* < 0,25$ .

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

При проектировании подобных систем охлаждения (рисунок 4.18 а) важным является определение количества  $n_{кан}$  и длины  $l_{кан}$  вентиляционных каналов 7 (рисунок 4.18 б).



1 – обмотка; 2 – статор; 3 – крышка; 4 – компрессионное кольцо;  
5 – комбинированный якорь; 6, 8 – вентиляционные отверстия; 7 – аксиальные  
вентиляционные каналы

Рисунок 4.18 – Линейный электромагнитный двигатель с самовентиляцией (а),  
эскиз статора с аксиальными вентиляционными каналами (б)

Для эффективности процесса охлаждения и предотвращения перегрева обмотки ЛЭМД должно соблюдаться условие, при котором объем охлаждающего воздуха  $V_{\partial\partial}^{\partial\partial}$ , проходящего через вентиляционные каналы за один ход якоря должен быть не меньше суммарного объема воздуха  $\Sigma V_{кан}$  в аксиальных вентиляционных каналах:

$$V_{\partial\partial}^{\partial\partial} \geq \Sigma V_{кан}, \quad (4.55)$$

где  $\Sigma V_{кан} = n V_{кан}$ ;  $n$  – количество каналов;  $V_{кан}$  – объем воздуха в одном аксиаль-

ном вентиляционном канале.

Для определения значения  $V_{кан}$  полагаем, что аксиальные вентиляционные каналы выполнены таким образом, что при развертке цилиндрического статора 2 по образующей оно будут иметь вид рисунка 4.19. Тогда

$$V_{кан} = l_{кан} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}, \quad (4.56)$$

где  $l_{кан} = \frac{h_{кан}}{\sin \beta}$  – длина канала;  $h_{кан}$  – высота вентиляционного канала;  $\beta$  – угол наклона вентиляционного канала к продольной оси.

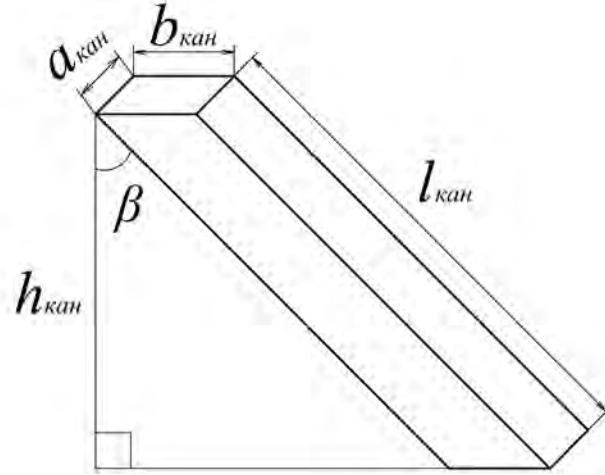


Рисунок 4.19 – Эскиз аксиального вентиляционного канала

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

$$V_{воз}^{эф} = \left[ \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right), \quad (4.57)$$

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 (4.55) с учетом (4.56) и (4.57) в виде

$$\left[ \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right] - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right) \geq n_{кан} \frac{h_{кан}}{\sin \beta} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}. \quad (4.58)$$

Тогда угол наклона  $\beta$  вентиляционного канала к продольной оси

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{n_{кан} \cdot h_{кан} \cdot a_{кан} \cdot b_{кан}}{\left( \frac{\pi d^2}{4} (h - h_{кан}) \right) - \left( \frac{\pi d_{я1}^2}{4} l_{я1} + \frac{\pi d_{я2}^2}{4} l_{я2} \right)} \right]. \quad (4.59)$$

Таким образом, при известных значениях  $a_{\text{кан}}$  и  $b_{\text{кан}}$  [17], варьированием угла наклона  $\beta$  вентиляционного канала можно добиться эффективного процесса интенсификации охлаждения обмотки ЛЭМД дискретных машин.

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

Тепловая схема замещения ЛЭМД с самовентиляцией (рисунок 4.20 б) составлена на основе конструктивной схемы (рисунок 4.20 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).

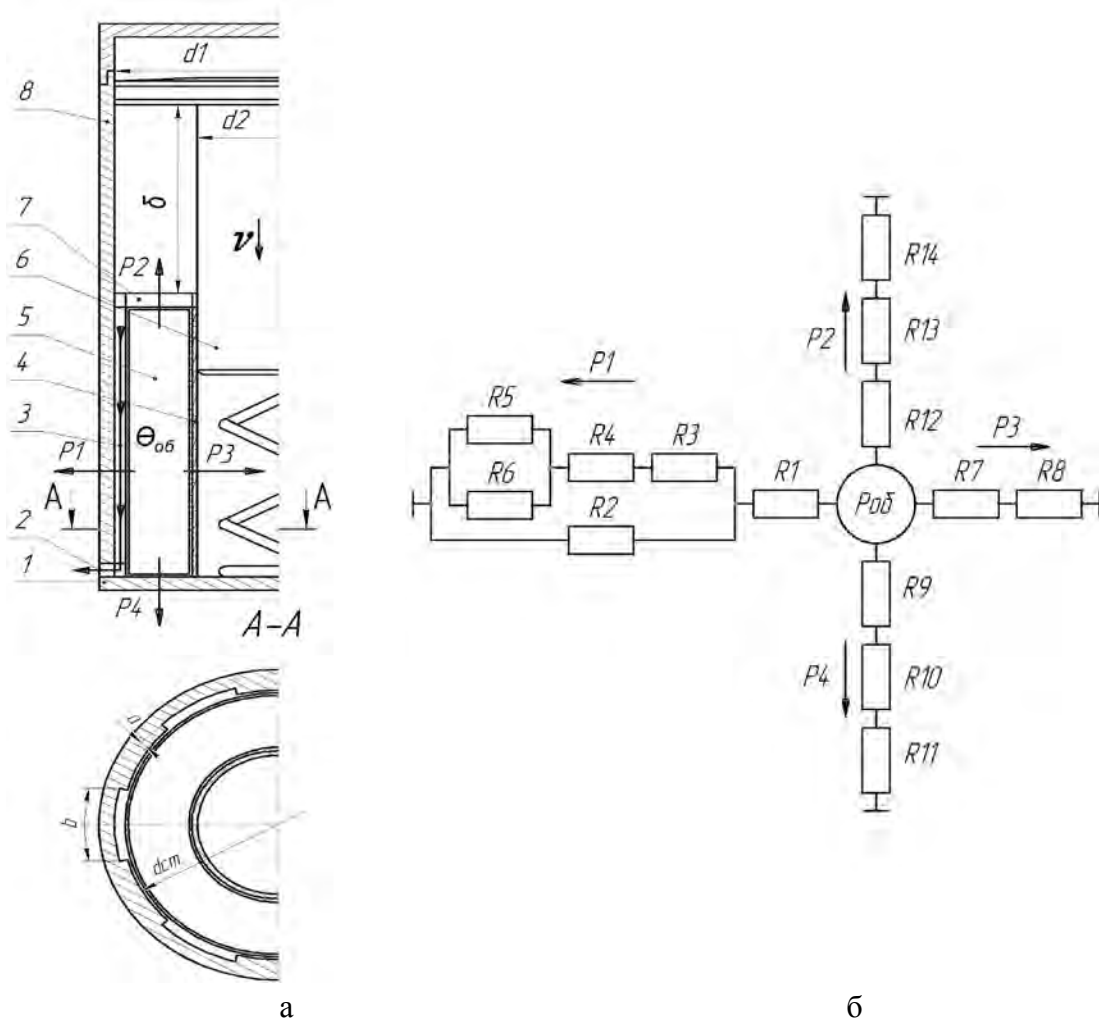


Рисунок 4.20 – Конструктивная схема линейного электромагнитного двигателя с самовентиляцией (а) и тепловая схема замещения (б)

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  $P2$  и  $P4$  можно пренебречь, а наличие изоляционного материала каркаса 4 позволяет пренебречь малым потоком  $P3$ . Тогда тепловая схема замещения примет вид рисунка 4.21.

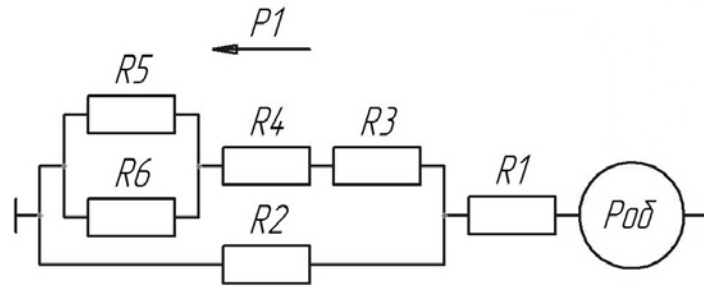


Рисунок 4.21 – Расчетная тепловая схема замещения ЛЭМД с самовентиляцией

Так как у базисного ЛЭМД отсутствуют вентиляционные каналы, то ее тепловая схема замещения с учетом упрощений имеет вид рисунка 4.22.

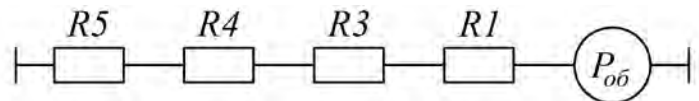


Рисунок 4.22 – Расчетная тепловая схема замещения базисного ЛЭМД

На основании формул для последовательного и параллельного сопротивлений определим эквивалентные тепловые сопротивления ЛЭМД с самовентиляцией  $R_{экв}^1$  и базисного двигателя  $R_{экв}^2$ :

$$R_{экв}^1 = R1 + \frac{R2 \left( R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6} \right)}{R2 + R3 + R4 + \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6}}, \quad (4.60)$$

$$R_{экв}^2 = R1 + R3 + R4 + R5. \quad (4.61)$$

Сопротивления теплопроводности определяется свойствами материалов и их размерами [87]:

$$\left. \begin{aligned} R1 &= \frac{\delta_{об}}{\lambda_{экв} S_{об}} \\ R3 &= \frac{\delta_з}{\lambda_г S_з} \\ R4 &= \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см} S_{см}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.62)$$

где  $\delta_{об}$ ,  $\delta_з$ ,  $\delta_{см}$  – соответственно толщина обмотки, зазора между обмоткой и статором, м;  $S_{об}$ ,  $S_з$ ,  $S_{см}$  – площади поперечного сечения соответственно об-

мотки, зазора, статора,  $\text{м}^2$ ;  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициенты теплопроводности воздуха и статора;  $\lambda_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки [87].

Сопротивления теплоотдачи определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{1}{\alpha_n S_{\text{об.н}}} \\ R_5 &= \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} S_{\text{нар}}} \\ R_6 &= \frac{1}{\alpha_n S_{\text{ст.н}}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.63)$$

где  $S_{\text{об.н}}$ ,  $S_{\text{ст.н}}$ ,  $S_{\text{нар}}$  – площади теплоотдающих поверхностей соответственно обмотки в пазу, статора в пазу и наружная двигателя,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{\text{нар}}$  – коэффициенты теплоотдачи в пазу и с наружной поверхности соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Определим площади теплоотдающих поверхностей:

$$S_{\text{об}} = \pi d_{\text{об}} h_{\text{об}}, \quad (4.64)$$

$$S_{\text{ст}} = \pi d_{\text{ст}} h_{\text{ст}}, \quad (4.65)$$

$$S_3 = \pi d_{\text{ст.вн}} h_{\text{об}} - S_{\text{об}}, \quad (4.66)$$

$$S_{\text{об.н}} = n h_{\text{об}} b \left( \frac{d_{\text{ст}}}{d_{\text{ст}} + 2a} \right), \quad (4.67)$$

$$S_{\text{ст.н}} = n h_{\text{об}} (2a + b), \quad (4.68)$$

$$S_{\text{нар}} = n d_{\text{нар}} h, \quad (4.69)$$

где  $d_{\text{об}}$ ,  $h_{\text{об}}$  – диаметр и длина обмотки;  $d_{\text{ст.вн}}$ ,  $d_{\text{ст.нар}}$  – диаметры статора внутренний и наружный;  $h_{\text{ст}}$  – длина статора;  $a$ ,  $b$ ,  $n$  – глубина, ширина и количество вентиляционных каналов (рисунок 4.16).

Обмотка ЛЭМД в тепловом отношении представляет собой гетерогенное тело со сложным распределением коэффициента теплопроводности  $\lambda$ . Однако при расчете эту гетерогенность не учитывают, приписывая обмотке некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$ . Он зависит от типа укладки, коэффициента заполнения  $k_z$ , коэффициента пропитки  $k_n$ , коэффициента теплопроводности изоляции провода  $\lambda_u$ , коэффициента теплопроводности пропиточного состава  $\lambda_n$ , диаметра провода  $d_n$  и средней температуры обмотки  $\theta_{\text{ср}}$  [83; 85]. Для инженерных расчетов можно воспользоваться упрощенной формулой, например, для непропитанных катушек, намотанных круглым медным проводом при шахматной намотке [83; 85]:

$$\lambda_{\text{экв}} = 2,18 \sqrt{\lambda_u \lambda_{\text{в}} \left( \frac{d_n}{\delta_u} + 1 \right)} - 1,33 \lambda_{\text{в}}, \quad (4.70)$$

где  $\lambda_u$  – теплопроводность изоляции, Вт/(м·°C);  $d_n$  – диаметр голого провода, м;  $\delta_u$  – толщина изоляции, м.

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_n$  в вентиляционном канале воспользуемся выражением

$$\alpha_n = 0,5(\alpha_{px} + \alpha_{xx}), \quad (4.71)$$

где  $\alpha_{px}$ ,  $\alpha_{xx}$  – коэффициенты теплоотдачи в вентиляционных каналах при рабочем и холостом ходах якоря, которые определяются по (4.53) и (4.54) соответственно.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{нар}$  свободной конвекцией с наружной поверхности двигателя в неограниченном пространстве можно вычислить по упрощенной формуле [83; 87]:

$$\alpha_{нар} = Nu_m \frac{\lambda_g}{L}, \quad (4.72)$$

где  $L$  – характерный геометрический размер, м;  $Nu_m$  – критерий Нуссельта.

$$Nu_m = C[Gr Pr]_m^n, \quad (4.73)$$

$$Gr = \frac{\beta g L^3 (\theta - \theta_0)}{\nu^2}, \quad (4.74)$$

$$Pr = \frac{\mu g c_p}{\lambda_g}, \quad (4.75)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения ( $\beta = 1/(273 + \theta_m)$ );  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\theta_m = (\theta + \theta_0)/2$ , К<sup>-1</sup>;  $\theta$ ,  $\theta_0$  – температура поверхности и температура окружающей среды соответственно, °C;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м<sup>2</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·°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 [87].

Предварительные расчеты позволили определить значения  $R_{эkv}^1$  и  $R_{эkv}^2$ :

$$\frac{R_{эkv}^2 - R_{эkv}^1}{R_{эkv}^2} \cdot 100\% \approx 35\%. \quad (4.76)$$

Таким образом, применение в приводе импульсных машин с возвратно-поступательным движением рабочих органов ЛЭМД с самовентилиацией позволит снизить тепловое сопротивление двигателей на 35%, что увеличит продолжительность работы при форсированном потреблении электроэнергии.

## **5 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН И СИСТЕМ С ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

### **5.1 Экспериментальные исследования электромагнитных машин.**

#### **Стенды, измерительная аппаратура, методики исследований**

Экспериментальные исследования рабочих процессов импульсных ЛЭМД ударных машин проводятся с целью получения полной информации о характеристиках испытуемой машины. Изучение закономерностей работы, выработка рекомендаций по рациональному выбору отдельных конструктивных и режимных параметров позволяют обеспечить максимальную механическую энергию на выходе двигателя при возможно большем КПД.

Исследования проводились с помощью экспериментальных установок, оснащенных комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать интересующие физические величины. В основу рассматриваемой методики положены работы [19; 35; 46; 54; 61; 100-102].

Функциональная схема и общий вид экспериментальной установки показаны на рисунках 5.1 и 5.2 соответственно. Установка содержит ударную машину с линейным электромагнитным двигателем УМ; импульсные электрические преобразователи: ЭП1, подключаемый к аккумуляторному источнику питания АИП1 и ЭП2 с емкостным накопителем энергии; аккумуляторный источник питания АИП2 (рисунок 5.1). Измерение и регистрация значений интересующих физических величин производятся комплектом контрольно-измерительной аппаратуры КИА.

Ударная машина с ЛЭМД закреплена на забиваемом стержне 1, который является нагрузкой. С якорем двигателя через соединительную втулку 2 жестко связан потенциометрический датчик перемещения 3 для снятия зависимости хода якоря от времени (рисунок 5.1).

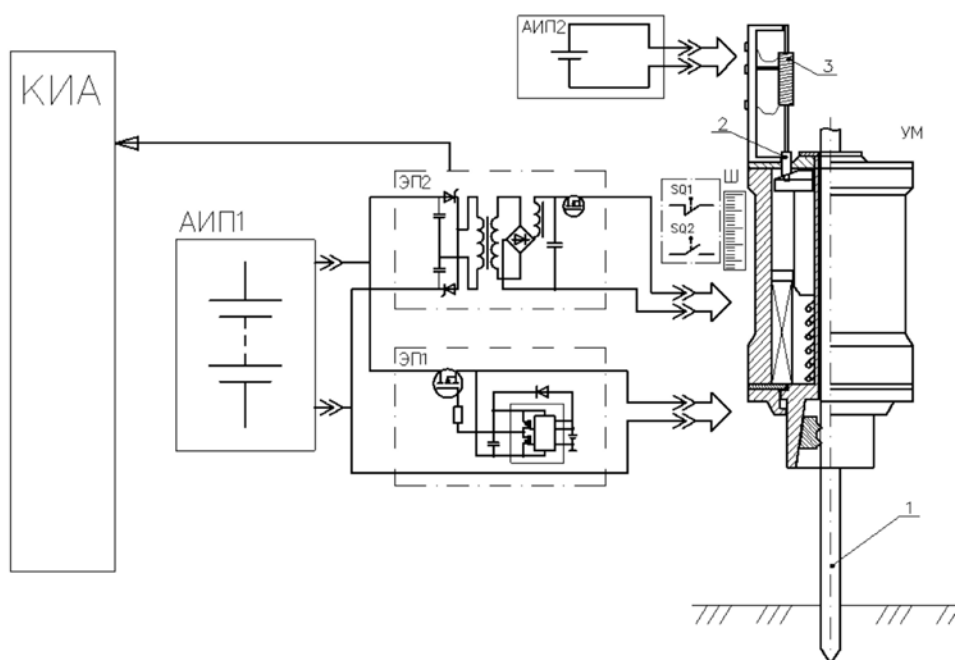


Рисунок 5.1 – Функциональная схема стенда для исследования рабочих процессов ЛЭМД



1 – забиваемый стержень, 2 – электромагнитная ударная машина,  
3 – электрический преобразователь с емкостным накопителем энергии,  
4 – конвертор, 5 – аккумуляторный источник питания

Рисунок 5.2 – Общий вид экспериментальной установки

Набор контрольно-измерительной аппаратуры КИА включает приборы непосредственной оценки, по которым производится визуальный контроль электрических параметров: амперметры, вольтметры (использованы цифровые приборы В7-21А, В7-22А) и регистрирующее устройство – персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем ЛА70-М4.

Электрические схемы стенда, включающие элементы систем управления ЛЭМД и измерения физических величин при питании обмотки от сетевого, емкостного и аккумуляторного импульсных преобразователей, показаны на рисунках 5.3, 5.4 и 5.5.

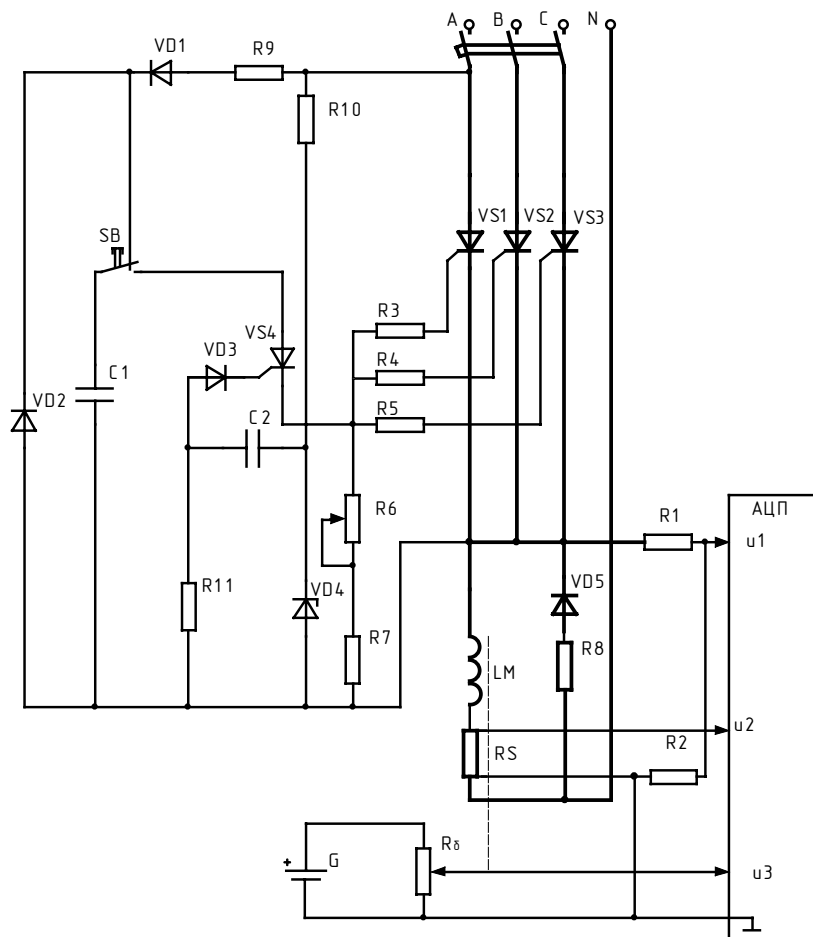


Рисунок 5.3 – Схема регистрации динамических характеристик ЛЭМД

154

Электрический преобразователь (рисунок 5.4) состоит из емкостного накопителя  $C_H$  и тиристора  $VS$ , соединенных с обмоткой  $LM$  ЛЭМД. Накопитель  $C_H$  заряжается от источника постоянного напряжения  $E$ . При нажатии на кнопку  $SB$  тиристор  $VS$  отпирается, и накопитель  $C_H$  подключается к обмотке  $LM$  двигателя, вызывая его срабатывание.

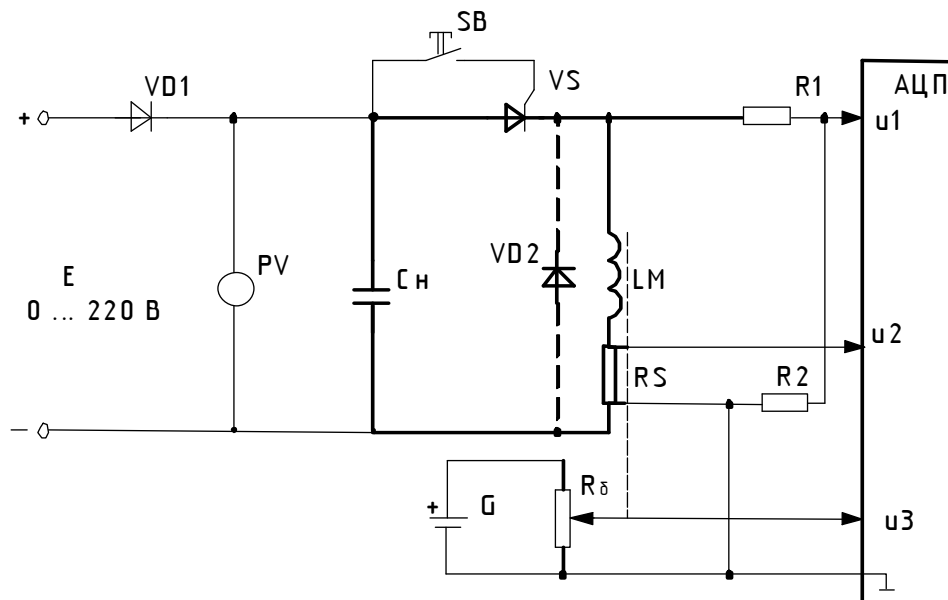


Рисунок 5.4 – Схема регистрации динамических характеристик ЛЭМД

Силовая часть преобразователя представленного на рисунке 5.5, состоит из аккумуляторного источника питания АИП1, прерывателя постоянного тока ППТ на транзисторе  $VT1$  и обмотки  $LM$  ЛЭМД ударной машины. Управление электромагнитной УМ производилось как в функции времени с помощью генератора импульсов ГИ, так и в функции положения якоря ЛЭМД посредством датчиков положения  $SQ1$  и  $SQ2$ .

Результаты исследования энергопреобразований в ЛЭМД с аккумуляторным источником питания подробно изложены в [50].

Для детального выявления особенностей электрического взаимодействия импульсной нагрузки (ЛЭМД) с источниками и электрическими преобразователями проводилась одновременная регистрация динамических характеристик исследуемого ЛЭМД: мгновенных значений напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ , протекающего по его обмотке, а также перемещения якоря  $\delta(t)$  в функции времени. Одновременная запись указанных величин производилась на персональный компьютер, связанный с исследуемой системой через многофункциональную плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

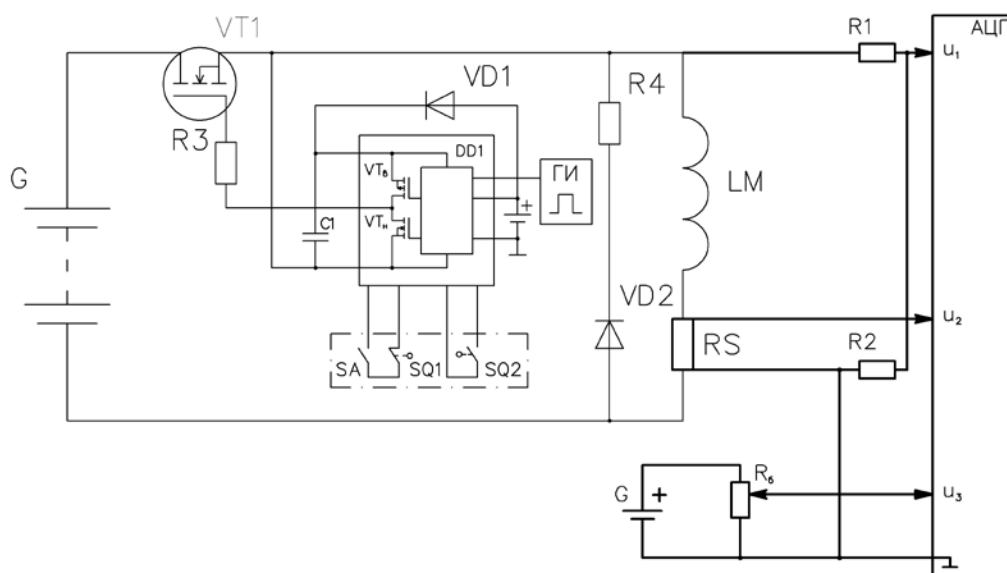


Рисунок 5.5 – Схема регистрации динамических характеристик ударной машины с ЛЭМД при питании от аккумуляторного источника

Контроль напряжения  $u_1$  на обмотке двигателя осуществлялся через делитель  $R1, R2$  (рисунки 5.3-5.5), служащий для согласования входного напряжения АЦП с измеренным. Истинное значение напряжения:

$$u = k_1 u_1, \quad (5.1)$$

где  $k_1$  – переводной коэффициент, зависящий от номиналов резисторов  $R1$  и  $R2$ .

Контроль тока осуществлялся с помощью стандартного нормального шунта НШ75 ( $RS1$ ), сигнал напряжения с которого  $u_2$  подавался непосредственно в АЦП. Истинное значение тока, протекающего по обмотке:

$$i = k_2 u_2, \quad (5.2)$$

где  $k_2$  – переводной коэффициент, зависящий от номинала шунта.

Тарировка потенциометрического датчика перемещения  $R_\delta$  выполнена по методике [50]. Истинное значение перемещения:

$$\delta = k_3 u_3 - k_4, \quad (5.3)$$

где  $k_3, k_4$  – переводные коэффициенты, зависящие от свойств датчика.

Данные, полученные с АЦП, компьютер регистрирует и записывает в электронную таблицу *Excel* (пакет прикладных программ *Microsoft Office* для операционных систем семейства *Windows*), с помощью которой ведется обработка полученных результатов и построение временных диаграмм. В программе использованы следующие формулы для вычисления необходимых величин:

- потребляемая от источника электроэнергия на интервале  $t_{cp}$  срабатывания

$$W_{эл} = \int_0^{t_{cp}} u(t) i(t) dt, \quad (5.4)$$

где  $u(t), i(t)$  – мгновенные значения напряжения и тока в обмотке в момент времени  $t$ ;

- энергия потерь в обмотке ЛЭМД

$$Q = \int_0^{t_{CP}} i^2(t) R dt, \quad (5.5)$$

где  $R$  – активное сопротивление обмотки;

- магнитная энергия

$$W_M = \int_0^{t_{CP}} e(t) i(t) dt, \quad (5.6)$$

где  $e(t) = u(t) - Ri(t)$  – ЭДС двигателя;

- потокосцепление

$$\Psi = \int_0^{t_{CP}} e(t) dt; \quad (5.7)$$

- механическая энергия на выходе ЛЭМД

$$A_y = mV^2/2, \quad (5.8)$$

где  $m$ ,  $V$  – масса и конечная скорость якоря;

- магнитный КПД

$$\eta = A_y / (W_{Mex} + W_{Mo}), \quad (5.9)$$

где  $W_{Mo}$  – остаточная магнитная энергия в двигателе по окончании движения

якоря

$$W_{Mo} = \int_0^{\Psi_k} i(t) d\Psi, \quad (5.10)$$

где  $\Psi_k$  – мгновенное значение конечного потокосцепления;

- коэффициент магнитной энергии

$$K_o = W_{Mo} / (A_y + W_{Mo}). \quad (5.11)$$

Интегралы в указанных выражениях находят по формуле:

$$\int f(x) dx = \sum_{i=1}^n 0,5[f(x_i) + f(x_{i+1})] \Delta t, \quad (5.12)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени с шагом, соответствующим периоду опроса платы АЦП, который составил  $\Delta t = 1$  мс.

Предударная скорость  $V$  определялась по формуле  $V = \delta'(t)$ , где  $\delta(t)$  – кривая перемещения (хода) якоря.

Для подсчета производной в некоторой точке  $x$  на промежутке  $(x_1, x_2)$  хода якоря использована формула  $\delta'(t) = (\delta(x_2) - \delta(x_1)) / (x_2 - x_1)$ , относительная погрешность которой сколь угодно мала при достаточно малом  $\Delta x = (x_2 - x_1)$ .

Относительная ошибка при определении энергии  $W_{эл}$  не превышает 2%. Суммарная относительная ошибка при определении КПД не превышает 3%. Количество измерений, обеспечивающих заданную точность, не превышает 5 [103].

При исследовании рабочих процессов и оценке эффективности электромагнитной машины характерным выходным показателем представляется пред-

ударная скорость якоря (бойка) ЛЭМД –  $V_y$ , определяющая энергию удара  $A_y$  и ударную мощность  $P_y$  машины.

Для повышения точности и оперативности измерений предупредной скорости  $V_y$  использовалась методика, основанная на применении специального контактного датчика скорости и стандартного частотомера [102; 104].

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 рисунке 5.6. В отличие от рассмотренного в работе [104] предлагаемое устройство выполнено без применения цифровых микросхем, допускает питание выпрямленным несглаженным напряжением и представляется простым и функциональным.

На рисунке 5.6 показаны временные диаграммы, электрическая схема блока и его соединения с ЛЭМД и контактным датчиком при измерении предупредной скорости  $V_y$  якоря. Схема содержит два формирователя импульсов – начала (ФИП) и окончания (ФИС) счета времени  $T$  и интегратор (И) [102].

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  $A$ ), 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 оставляющего частотомер импульса (вход  $B$ ) 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  $\Delta l$  начавшегося совместного движения якоря 1 и стрежня 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  $\tau$  задается характерной продолжительностью «дребезга» соударяющихся элементов 1, 2. При этом для нормальной работоспособности устройства необходимо, чтобы время  $\tau_1$  заряда конденсатора  $C1$  до напряжения «пробоя» порогового элемента  $VD3$  и измеряемый временной интервал  $T$  для участка движения  $\Delta l$  определялись соотношением  $\tau_1 \approx 3\tau \approx (0,2 \div 0,4)T$ .

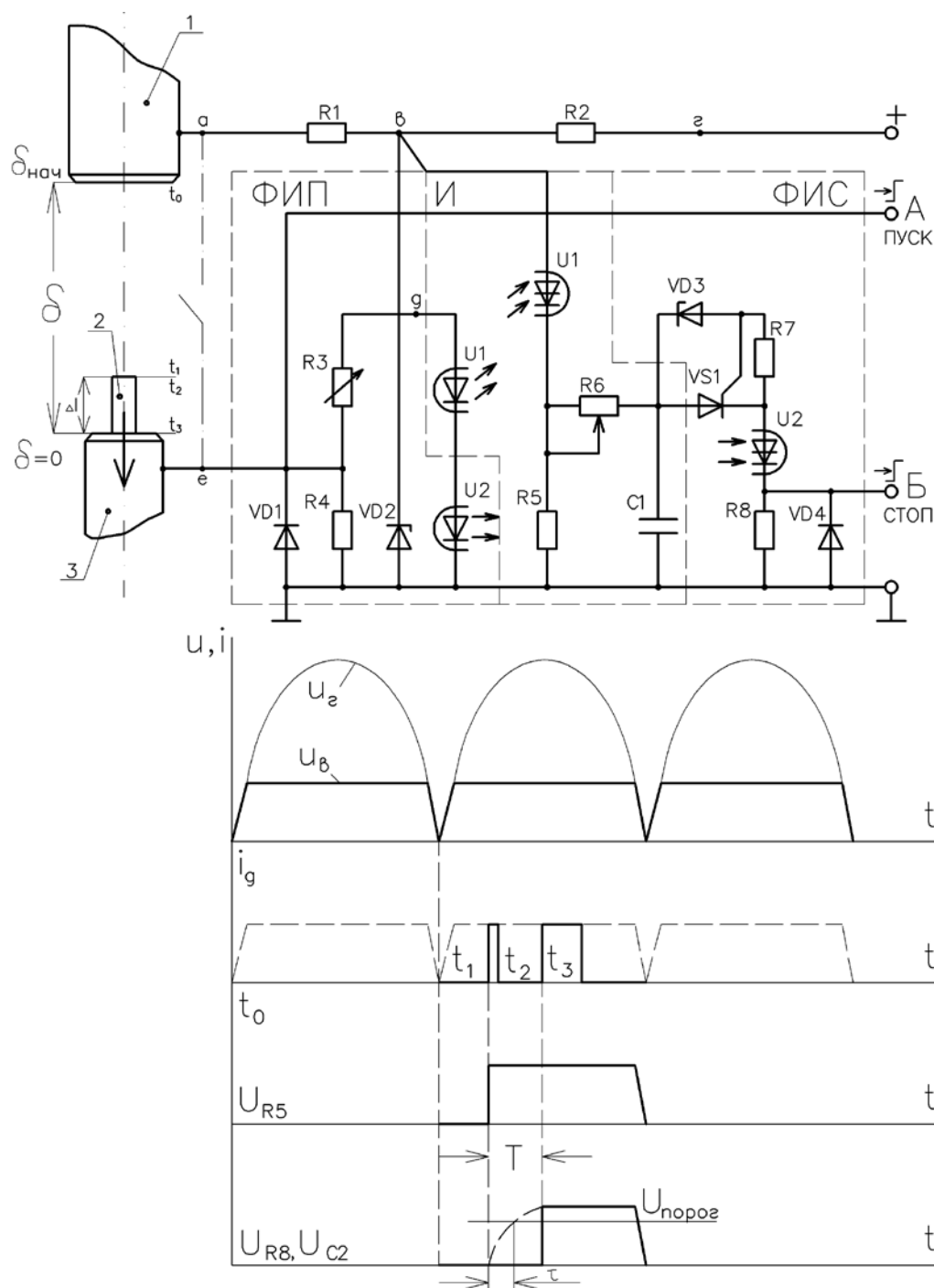


Рисунок 5.6 – Электрическая схема и временные диаграммы устройства преобразования электрических сигналов

В момент  $t_3$  якорь 1 ЛЭМД, полностью вдавив стержень 2 в корпус 3, производит по нему удар, опять обретая электрический контакт с этим корпусом. Вновь импульс положительного напряжения в точке 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  $B$ ). Интервал  $T=(t_3-t_1)+\Delta t$ , зафиксированный частотомером, определит предупредную скорость якоря  $V_y=\Delta l/T$ .

В сравнении с рассмотренным в [104] предлагаемое устройство обладает большей инерционностью, определяемой суммарным временем включения тиристора  $VS1$  и оптрона  $U2$ :  $\Delta t=t_{вклVS1}+t_{вклU1}$ . Однако его быстродействие остаётся высоким по сравнению со скоростью протекающих в ЛЭМД процессов. Для характерных значений  $t_{вклVS1}\leq 2\text{мкс}$  (КУ101Е),  $t_{вклU2}\leq 10\text{мкс}$  (30У103) и измеряемого интервала  $T=0,8\dots 1,2\text{мс}$  вносимая относительная задержка  $\frac{\Delta t}{T}=\frac{12\cdot 10^{-6}}{1,2\cdot 10^{-3}}=0,01$  оказывается очень небольшой и увеличение погрешности измерения незначительным.

Предварительный анализ рабочих циклов электромагнитных машин для заявленных применений показал, что это многофакторные системы, которые характеризуются независимыми входными величинами (факторами) и зависимыми выходными (параметрами). Сопоставлением динамических характеристик было выявлено, что наибольшее влияние на выходные параметры (энергию  $A_y$ , ударную мощность  $P_y=A_y n$  и КПД  $\eta$ ) оказывают жесткость  $Z$  упругого возвратного элемента, начальный воздушный зазор  $\delta_n$  ЛЭМД, координаты управляющих датчиков, определяющие продолжительность питающего импульса тока, напряжение источника  $U_n$ , и существует задача нахождения функциональных взаимосвязей между двумя параметрами (например,  $A_y$ ,  $\eta$ ) и четырьмя факторами. Для достоверной оценки результатов при определении функциональных взаимосвязей между этими величинами использованы два характерных подхода:

- первый – упрощенный, в основе которого лежит принцип суперпозиции [49; 50];
- второй – с использованием теории планирования экспериментов [105-108].

Первый подход иллюстрируется примером исследования ударной электромагнитной машины, обеспечивающей выходную энергию  $A_y$  в диапазоне 25...50 Дж и предназначенной для неторцевой забивки длинных продольно-неустойчивых стержней, инженерных изысканий, специальных применений [35; 50]. Здесь для поставленной задачи по результатам предварительных экспериментов были определены диапазоны варьирования факторов и назначено количество их уровней.

Предлагаемая методика экспериментальных исследований рабочих процессов, не решая задачи отыскания глобального оптимума ввиду сложности совокупного влияния факторов на рабочий процесс УМ, позволяет определить частные экстремумы для каждого фактора и установить рациональные соотно-

шения между возмущающими факторами и выходными параметрами ударной машины.

Второй подход – с применением теории планирования экспериментов – иллюстрируется исследованиями переносной электромагнитной машины с осевым каналом для погружения продольно-неустойчивых стержней с выходной энергией  $A_y=30-40$  Дж [35; 64].

Метод полного факторного эксперимента основан на положении о том, что исследуемую непрерывную функцию  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , имеющую все производные в заданной точке с координатами  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ , можно разложить в ряд Тейлора [105; 107]:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\dots+\beta_nX_n+\beta_{12}X_1X_2+\dots+\beta_{(n-1)n}X_{n-1}X_n+ \\ +\beta_{11}X_1^2+\beta_{22}X_2^2+\dots+\beta_{nn}X_{nn}^2, \quad (5.13)$$

где  $\beta_0$  – значение функции отклика в начале координат  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ ;

$$\beta_i=\partial Y/\partial X_i; \beta_{ij}=\partial^2 Y/\partial X_i\partial X_j; \beta_{ii}=0,5\partial^2 Y/\partial X_i^2. \quad (5.14)$$

Выбранные факторы  $X_1, X_2, \dots, X_n$  являются размерными величинами, имеют разные порядки, что приводит к значительным неудобствам при вычислениях. Для упрощения записи условий опыта и обработки его данных в теории планирования многофакторного эксперимента предварительно проводится операция кодирования. Кодированные и натуральные значения факторов связаны между собой соотношением [105; 107]

$$\bar{X}_i=(X_i-X_{0i})/\Delta X_i, \quad (5.15)$$

где  $X_{0i}$  – исходный уровень  $i$ -го фактора;  $\Delta X_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Исходный уровень  $X_{0i}$   $i$ -го фактора определим из выражения:

$$X_{0i}=(X_{i.min}+X_{i.max})/2, \quad (5.16)$$

где  $X_{i.min}$  – значение минимального уровня фактора;  $X_{i.max}$  – значение максимального уровня фактора.

Интервал варьирования определим по формуле:

$$\Delta X_i=X_{i.max}-X_{0i}=X_{0i}-X_{i.min}. \quad (5.17)$$

Получим значения максимального  $\bar{X}_{i.max}$  и минимального  $\bar{X}_{i.min}$  уровней фактора в кодированном виде [107]:

$$\bar{X}_{i.max}=(X_{i.max}-X_{0i})/\Delta X_i=+1, \quad (5.18)$$

$$\bar{X}_{i.min}=(X_{0i}-X_{i.min})/\Delta X_i=-1. \quad (5.19)$$

Таким образом, в кодированном виде максимальный уровень любого фактора всегда равен «+1», а минимальный – «-1». Исходный уровень любого фактора в кодированном виде всегда равен нулю:

$$\bar{X}_{0i}=(X_{0i}-X_{0i})/\Delta X_i=0. \quad (5.20)$$

Интервал варьирования любого фактора  $\Delta X_i$  в нормированном виде всегда равен 1:

$$\Delta \bar{X}_i = \bar{X}_{i, \max} - \bar{X}_{0i} = 1. \quad (5.21)$$

Произведя операцию кодирования факторов, с учетом выбранных пределов их изменения в эксперименте ряд Тейлора запишем в виде регрессионного полинома:

$$Y = A_0 + A_1 \bar{X}_1 + A_2 \bar{X}_2 + \dots + A_n \bar{X}_n + A_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 + \dots + A_{(n-1)n} \bar{X}_{n-1} \bar{X}_n + \\ + A_{11} \bar{X}_1^2 + A_{22} \bar{X}_2^2 + \dots + A_{nn} \bar{X}_n^2, \quad (5.22)$$

где  $A_0, A_i, A_j, A_{ij}$  – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии для полинома (5.22) вычислим с помощью формул [107]:

$$A_0 = 1/m \sum_{j=1}^m Y_j - A_{11}/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 - \dots - A_{nn}/m \sum_{j=1}^m X_{jn}^2; \quad (5.23)$$

$$A_i = \sum_{j=1}^m X_{ij} Y_j / \sum_{j=1}^m (X_{ij})^2, \quad (i \neq 1); \quad (5.24)$$

$$A_{iu} = \sum_{j=1}^m X_{ij} X_{uj} Y_j / \sum_{j=1}^m (X_{ij} X_{uj})^2, \quad (i \neq 1); \quad (5.25)$$

$$A_{ii} = \sum_{j=1}^m \left( X_{ij} - 1/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 \right) Y_i / \sum_{j=1}^m \left( X_{ij}^2 - 1/m \sum_{j=1}^m X_{ij}^2 \right)^2, \quad (5.26)$$

где  $j$  – номер опыта;  $i, n$  – номера факторов.

В процессе проведения эксперимента возникает потребность проверить соответствие экспериментальных данных теоретическим предпосылкам, то есть проверить гипотезу исследования. Проверка экспериментальных данных на адекватность необходима также во всех случаях на стадии теоретико-экспериментальных исследований. Методы оценки адекватности основаны на использовании доверительных интервалов, позволяющих с заданной доверительной вероятностью определять искомые значения оцениваемого параметра. Суть такой проверки состоит в сопоставлении полученной теоретической функции с результатами измерений.

Оценить адекватность можно с помощью критерия согласия Фишера [107]:

$$K_{\phi p} = [\max(D_a; D_{cp})] / [\min(D_a; D_{cp})], \quad (5.27)$$

где  $D_a$  – дисперсия адекватности;  $D_{cp}$  – дисперсия средних значений.

В числителе принимается наибольшее, в знаменателе – наименьшее значение из вычисленных величин дисперсии.

Определим значение дисперсии адекватности по выражению

$$D_a = 1/(m-b) \sum_{i=1}^m (Y_{i\alpha} - Y_{ip})^2, \quad (5.28)$$

где  $Y_{iэ}$ ,  $Y_{ip}$  – средние экспериментальные и теоретические значения измерений;  $b$  – количество коэффициентов регрессии принятого теоретического уравнения (5.22).

Дисперсию средних значений  $D_{cp}$  определим по формуле

$$D_{cp} = 1/nm \sum_1^m (Y_i - \bar{Y})^2. \quad (5.29)$$

Уравнение регрессии (5.22) считается адекватным при

$$K_{фp} \leq K_{фm}, \quad (5.30)$$

где  $K_{фm}$  – табличное значение критерия согласия, принимается при числе степеней свободы  $q$  [107].

Число степеней свободы для числителя  $q_1$  и знаменателя  $q_2$  вычисляем по формуле

$$q_1 = n - b; \quad q_2 = m(n - 1). \quad (5.31)$$

Критерий согласия Фишера целесообразно применять при малой выборке [107].

Далее в главе изложены результаты анализа динамических характеристик электромагнитной ударной машины для погружения металлических стержневых элементов в грунт с использованием этого подхода [35].

В каждой серии экспериментов проводилась регистрация динамических характеристик. Для обработки полученных кривых использованы статистические методы обработки и анализа результатов экспериментов [107]. 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 движения. 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 [107].

## 5.2 Исследование энергопреобразования ЛЭМД, питаемого от сети

Проведем анализ рабочего процесса и особенностей энергопреобразования ЛЭМД, питаемого через импульсный преобразователь от источника переменного тока. В качестве примера рассмотрим машину с выходной механической энергией  $A_y \leq 30$  Дж, применяемую, в частности, для предотвращения сводообразования [19], подключаемую к однофазной сети с номинальным напряжением 220 В. Характерный вид полученных экспериментально временных диаграмм  $u(t)$ ,  $i(t)$ ,  $\delta(t)$  рабочего процесса ЛЭМД показан на рисунке 5.7.

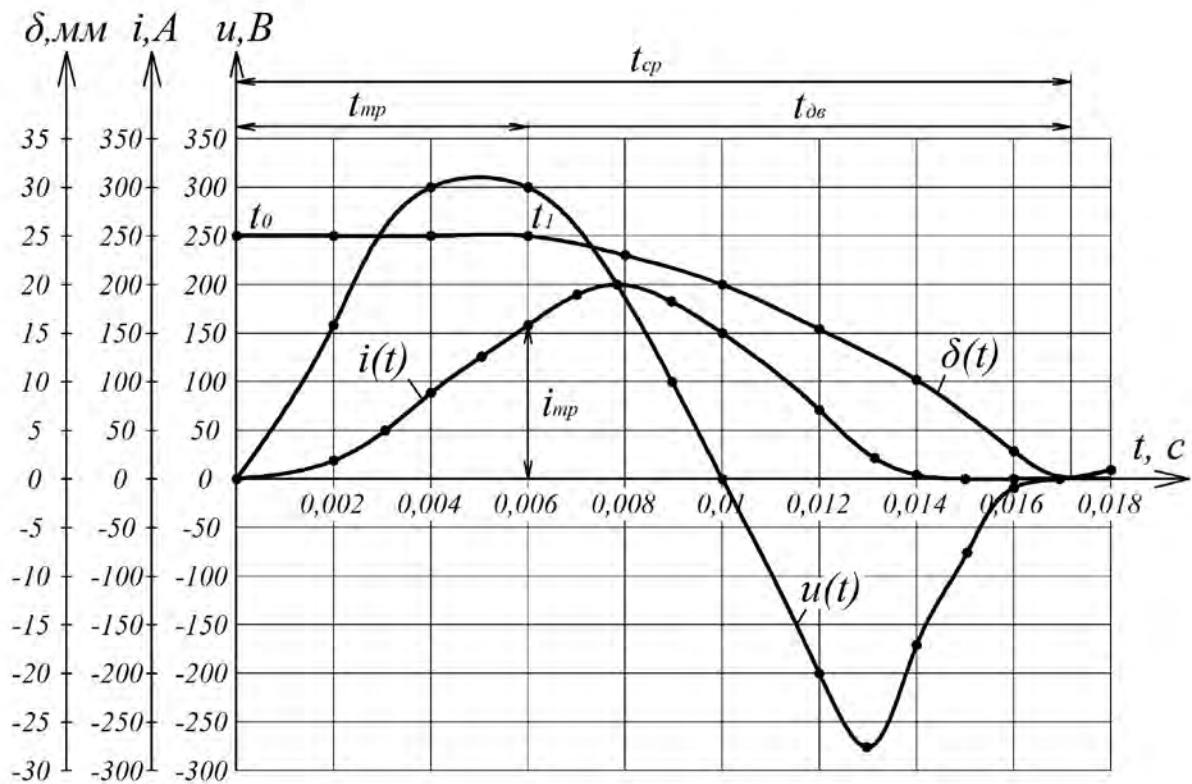


Рисунок 5.7 – Динамические характеристики ЛЭМД, питаемого от однофазной сети

На динамических характеристиках начало рабочего цикла соответствует моменту времени  $t_0$ , когда на обмотку ЛЭМД подается импульс выпрямленного напряжения  $u(t)$  от ЭП. В обмотке двигателя возникает ток  $i(t)$ , интенсивность роста и значение которого зависит от величины приложенного напряжения и характеристик обмотки. Однако в течение промежутка времени  $t_1 - t_0 = t_{TP}$  якорь остается неподвижным, поскольку противодействующее его ходу усилие  $F_{ПР}$ , создаваемое возвратной пружиной, превосходит электромагнитное усилие  $F_{Э}$ . Для этапа  $t_{TP}$  баланс энергий в дифференциальной форме имеет вид  $u(t)i(t)dt = i^2(t)Rdt + i(t)d\Psi$ , и электрическая энергия, потребляемая от источника, частично преобразуется в теплоту  $d\Delta Q = i^2(t)Rdt$  и диссипатирует, а частично — в энергию магнитного поля  $dW_{МАГ} = i(t)d\Psi$  и аккумулируется в машине [19]. Уровень запасенной в ЛЭМД на этапе  $t_{TP}$  магнитной энергии оказывает существенное влияние на последующий на рабочем ходе этап энергопреобразования и выходные показатели ЛЭМД. Из соотношения следует, что чем больше значение тока  $i_{TP}$  в обмотке, при котором начинается движение якоря, тем больший запас магнитной энергии накоплен в двигателе, тем большая часть этой энергии может быть преобразована на этапе  $t_{ДВ}$  рабочего хода. В момент времени  $t_1 = t_{TP}$ , когда  $F_{Э} > F_{ПР}$ , начинается движение якоря в направлении уменьшения рабочего зазора и в течение промежутка  $t_{ДВ}$  происходит его разгон под действием

результатирующей силы  $F_P = F_{\Sigma} - F_{ПР}$  до момента соударения с нагрузкой (точка *b* на диаграмме). Энергетический баланс для этого интервала на элементарном промежутке времени  $dt$  может быть представлен в виде  $u(t)i(t)dt = i^2(t)Rdt + Li(t)di + i^2(t)dL$ . Таким образом, на рабочем ходе якоря часть энергии источника преобразуется в теплоту, а часть – в энергию магнитного поля, которая, в свою очередь, частично пополняет имеющийся запас магнитной энергии ЛЭМД, а частично преобразуется в механическую работу перемещения якоря. Перераспределение этих двух составляющих уравнения энергетического баланса зависит и от свойств двигателя, и от показателей источника [19; 50].

Для рабочего цикла (рисунок 5.7) после соударения якоря с нагрузкой в магнитной системе не остается неизрасходованного запаса энергии, вследствие чего под действием упругих сил сжатой пружины якорь начинает холостой ход и возвращается в исходное положение. Из рисунка 5.7, в частности, следует, что однофазный однополупериодный выпрямитель формирует питающие импульсы  $u(t)$ ,  $i(t)$  с пологими фронтами, что ухудшает достижимые удельные показатели ЛЭМД. Так, предупредная скорость якоря, вычисленная по кривой перемещения  $\delta(t)$ , составила  $V=2,7$  м/с, а энергия удара  $A_y=8,4$  Дж.

В главе 2 показано, что эффективным способом повышения энергии удара и КПД редкоударных ЛЭМД служит форсировка процесса аккумуляирования магнитной энергии в индуктивностях машины на этапе трогания при неподвижном якоре. Движение якоря ЛЭМД обеспечивается, когда электромагнитная сила  $F_{\Sigma}$ , определяемая значением тока  $i_{ТР}$  в обмотке, становится больше противодействующей  $F_{ПР}=k\delta$ , создаваемой возвратной пружиной. Чем больше жесткость  $k$  применяемой пружины, тем большее значение  $i_{ТР}$  необходимо обеспечить в обмотке ЛЭМД для начала движения якоря и тем больше к моменту  $t_{ТР}$  в объеме рабочих зазоров будет аккумуляироваться магнитной энергии. Однако применение жестких с большим значением  $k$  возвратных пружин энергетически очень не выгодно, поскольку они создают на всем рабочем ходе постоянно возрастающее противодействие якору, существенно уменьшают его предупредную скорость и соответственно выходные показатели машины. Для преодоления этого противоречия в редкоударных ЛЭМД целесообразно обеспечивать холостой ход якоря сравнительно мягкими, с малыми значениями  $k$ , пружинами, а регулируемое по величине начальное противодействующее усилие, повышающее ток трогания  $i_{ТР}$  и показатели ЛЭМД, создавать дополнительным устройством, например, небольшим электромагнитом с релейной или близкой к ней характеристикой «сила удержания  $F_0$  – ход якоря  $\delta$ ». В этом случае до момента трогания якорь будет нагружен суммарным противодействующим усилием  $F_{ПР} + F_0$  мягкой пружины и электромагнита удержания, которое резко уменьшается до значения  $F_{ПР}$  после

трогания якоря и мало влияет на показатели цикла энергопреобразования ЛЭМД сводообрушителя.

Проведем оценку влияния удержания якоря на энергетические показатели двигателя сводообрушителя. Наглядное представление о таком влиянии дают энергетические диаграммы ЛЭМД, построенные в осях  $\Psi - i$  «потокосцепление – ток».

С использованием рекомендаций [50] построены статические характеристики намагничивания ЛЭМД  $\Psi = f(i, \delta)$  для различных положений якоря. Методика предполагает включение обмотки электромагнита на постоянное напряжение различной величины. Однако имеющая место здесь избыточность интервала времени, в течение которого установившейся ток протекает по катушке, вызывает ее повышенный нагрев и изменение омического сопротивления. С целью снижения температуры нагрева обмотки двигателя при снятии статических характеристик использован ЭП с промежуточным емкостным накопителем энергии большой емкости ( $C=0,28 \dots 0,3$  Ф), заряжаемый различными значениями напряжений. При разряде такого накопителя на обмотку время возрастания тока до установившегося значения и измерения показателей испытуемого ЛЭМД составляло  $0,09 \dots 0,095$  с, что позволило в  $2,5 \dots 3$  раза снизить температуру нагрева обмотки.

Линия динамического перехода построена с использованием экспериментальных динамических характеристик ЛЭМД при однофазном сетевом питании [50]. Для этого по кривым потокосцепления и перемещения якоря найден ряд мгновенных значений потокосцепления и положения якоря для одних и тех же моментов времени. Полученные значения потокосцепления отложены на оси ординат статических характеристик  $\Psi = f(i, \delta)$ , и через найденные точки проведены горизонтальные линии до пересечения со статической магнитной характеристикой, построенной для того рабочего зазора, которому соответствует взятая величина потокосцепления.

На рисунке 5.8 представлены энергетические диаграммы исследуемого ЛЭМД, состоящие из линий динамического перехода и ограничивающих их статических магнитных характеристик, которые соответствуют двум предельным положениям якоря.

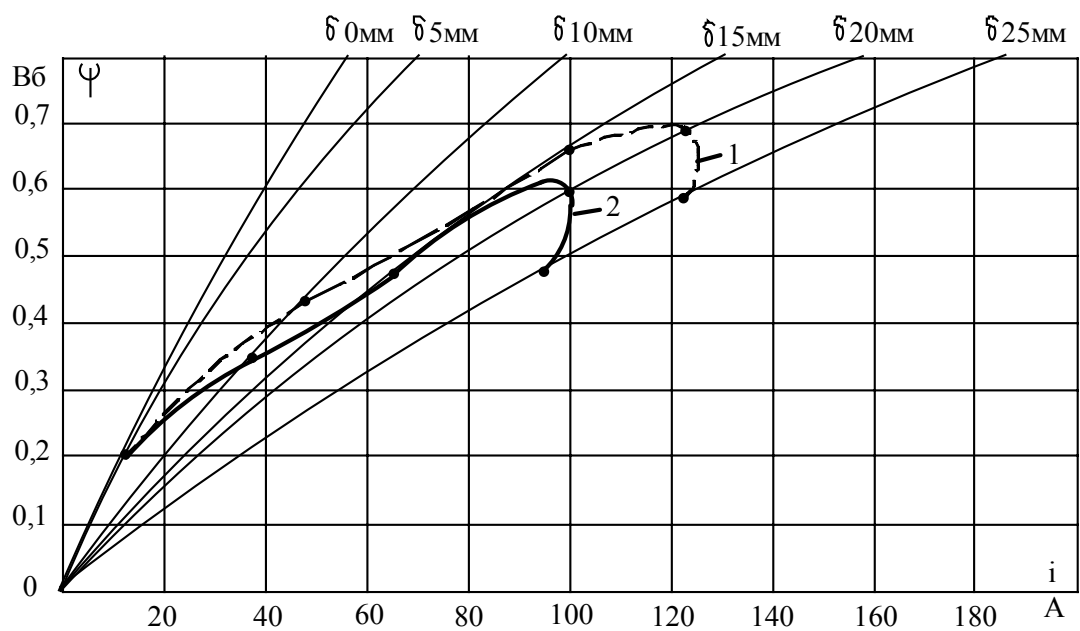


Рисунок 5.8 – Энергетические диаграммы ЛЭМД сводообрушителя с устройством удержания якоря – 1 и без него – 2

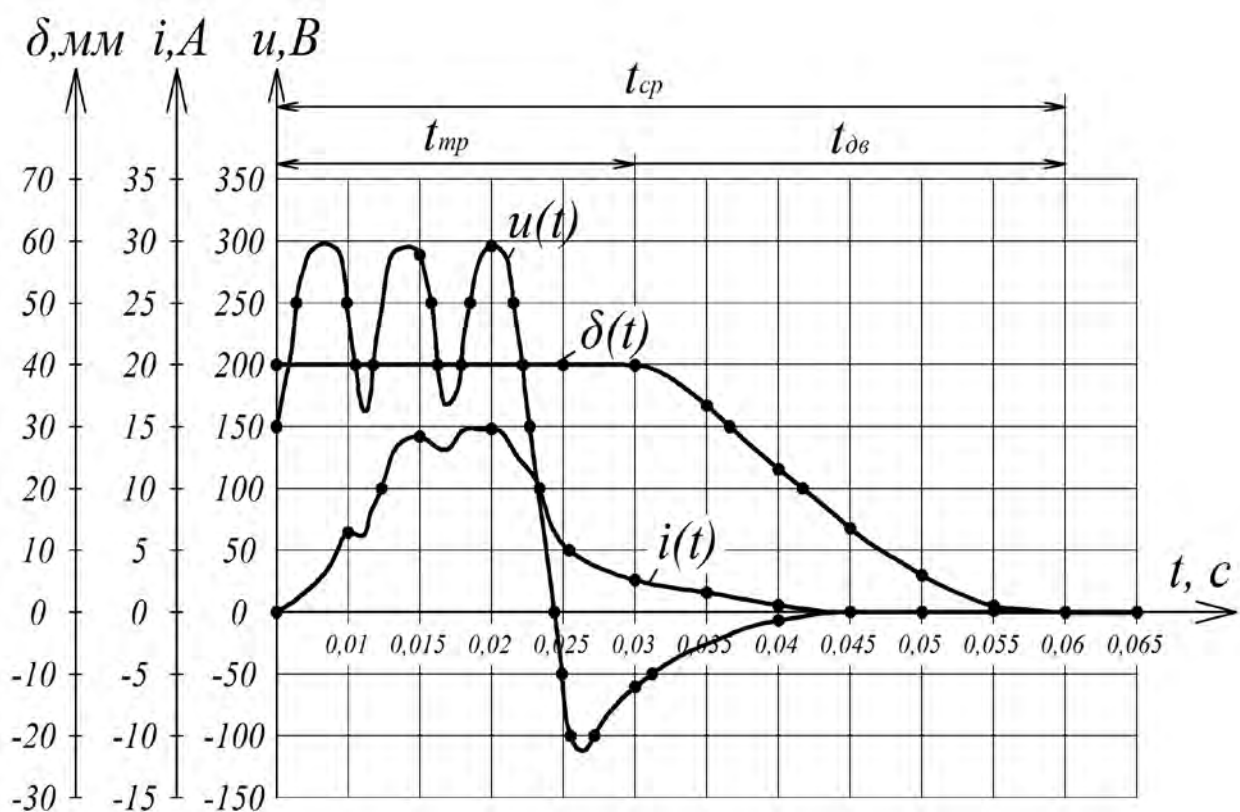


Рисунок 5.9 – Динамические характеристики ЛЭМД при трехфазном питании ( $A_y = 4$  Дж)

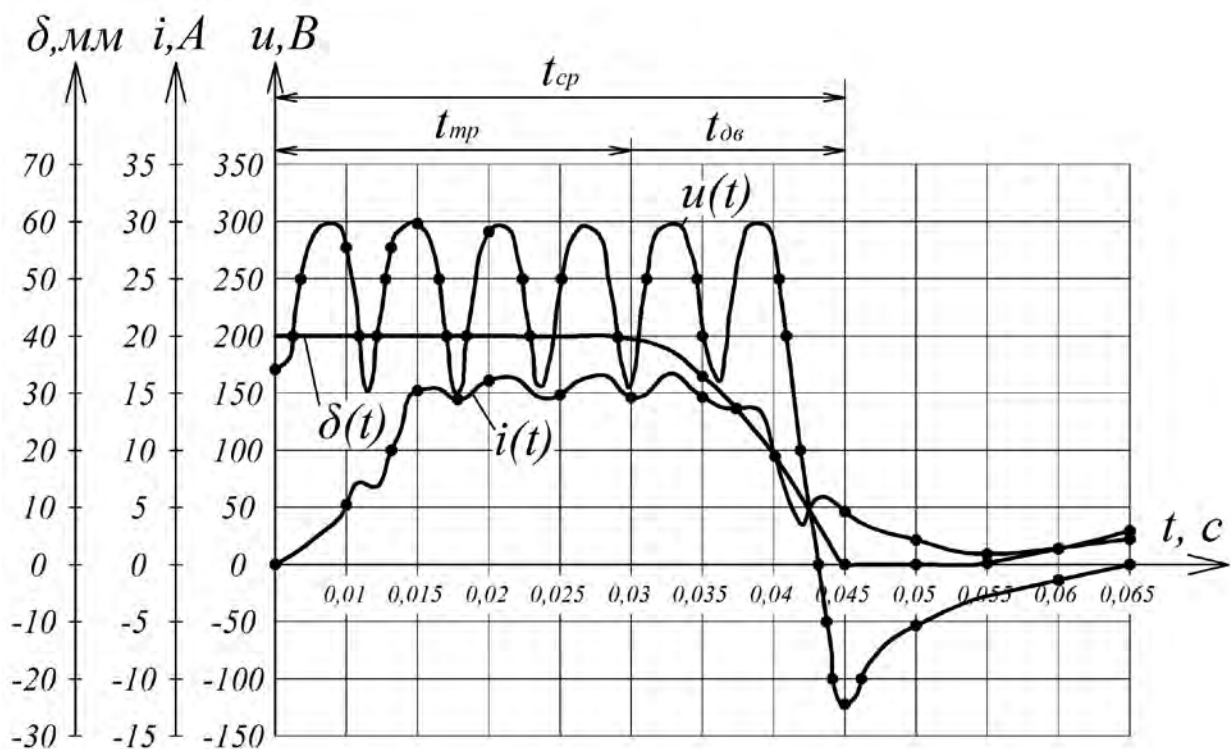


Рисунок 5.10 – Динамические характеристики ЛЭМД при трехфазном питании ( $A_y = 46$  Дж)

С учетом экспериментальных данных, полученных в работе [19; 50], пунктиром построен магнитный цикл при усилии удержания  $F_0 = 0,25$  кН. Из полученных циклов определены энергетические характеристики ЛЭМД. Их сравнение свидетельствует, что применение устройства удержания якоря позволяет повысить значения КПД  $\eta_M$  и  $\eta$  соответственно в 1,5 и 1,4 раза, а  $A_y$  и  $W_{MH}$  в 1,7 и 1,64 раза.

Таблица 5.1 – Энергетические показатели ЛЭМД с устройством удержания якоря и без него

Цикл	Механическая энергия, $A_y$	Магнитный КПД, $\eta_M$	Начальная магнитная энергия, $W_{MH}$	КПД
$F_0 = 0$	Дж	о.е.	Дж	%
	8,4	0,2	22	8,4
$F_0 = 0,25$ кН	14	0,3	36	12

Сопоставление энергетических диаграмм (рисунок 5.8) и анализ уравнения  $u(t)i(t)dt = i^2(t)Rdt + Li(t)di + i^2(t)dL$  показывают, что между нагружающим якорь усилием  $F_0$  и преодолевающим его электромагнитным усилием  $F_{ЭМ.ТР.}$ , определяемым током  $i_{ТР.}$ , должно быть такое соотношение, чтобы после трогания

разгон якоря, хотя бы на начальной части его рабочего хода, обеспечивался нарастающим по величине током в обмотке (рисунок 5.7).

Именно в этом случае имеет место интенсивное пополнение запаса магнитной энергии в двигателе, ее эффективное преобразование в механическую работу и повышение выходных энергетических показателей ЛЭМД. Нарушение этого требования при произвольном завышении удерживающего усилия ухудшает показатели машины. Когда усилие  $F_0$  достигнет значения начального тягового усилия ЛЭМД, рабочий ход не совершается.

Для сводообрушителей с энергией удара 35...50 Дж следует использовать ЭП, работающие от трехфазной сети. На рисунках 5.9, 5.10 показаны в качестве примера динамические характеристики ЛЭМД с различной длительностью протекания тока через его обмотку. Из диаграмм, в частности, следует, что такие электрические преобразователи позволяют регулировать механическую энергию двигателя в диапазоне 4...46 Дж.

### 5.3 Электромагнитная ударная машина с конденсаторным питанием

При анализе рассматриваемых многофакторных систем представляется целесообразным воспользоваться и другим распространенным в исследовательской практике методом – методом теории планирования экспериментов [105-108]. Здесь при оптимизации системы задача ставится следующим образом: определить значения некоторой совокупности факторов системы из возможной области их варьирования, обеспечивающей максимум энергии удара. При такой постановке энергия удара  $A_y$  выступает в качестве параметра оптимизации, а частота ударов бойка  $n$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  – в качестве ограничений, так как между энергией удара  $A_y$ , КПД и потребляемой энергией  $W_{эл}$  существует связь:

$$\eta = A_y / W_{эл}. \quad (5.32)$$

Выходной параметр исследуемой системы – энергия удара  $A_y$  – определяется следующим образом:

$$A_y = mV^2/2, \quad (5.33)$$

где  $m$  – масса бойка;  $V$  – предударная скорость бойка.

При питании ударной электромагнитной машины от емкостного накопителя электрической энергии предударная скорость бойка  $V$  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 ( $m_{я}, r = const$ ). Следовательно, независимыми переменными, влияющими на энер-

гию удара  $A_y$ , являются емкость  $C$ , напряжение  $U$  промежуточного накопителя и жесткость возвратной пружины  $z$ .

Запасаемая энергия  $W_{эл}$  емкостного накопителя определяется по формуле:

$$W_{эл} = CU^2/2, \quad (5.34)$$

следовательно согласно (5.32) КПД также будет определяться как функция зарядной емкости  $C$  и напряжения  $U$  конденсаторного накопителя энергии и жесткости пружины  $z$ .

Динамические характеристики исследуемой системы  $i(t)$ ,  $u(t)$  и  $\delta(t)$  могут быть получены либо в результате решения дифференциальных уравнений [39; 43; 109; 110], либо в процессе экспериментов. По ним легко судить об энергии удара, частоте ударов и КПД системы, принимая в качестве независимых переменных емкость  $C$  и напряжение  $U$  накопителя энергии и жесткость возвратного элемента  $z$ .

При трех независимых факторах и вариации их на трех уровнях необходимо получить следующие зависимости:

$$A_y = f(C, U, z,); \quad (5.35)$$

$$n = f(C, U, z,); \quad (5.36)$$

$$\eta = f(C, U, z,). \quad (5.37)$$

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:  $C=0,01...0,13$  Ф,  $U=50...120$  В,  $z=500...1100$  Н/м.

Для определения влияния параметров промежуточного конденсаторного накопителя (емкости  $C$  и напряжения  $U$ ) и жесткости возвратного элемента  $z$  при проведении исследований воспользуемся трехфакторным экспериментом.

Решение интерполяционной задачи состоит в построении регрессионного уравнения (5.35)

$$A_y = f(C, U, z,),$$

адекватного результатам опытов. Для этого составим план эксперимента и определим его основные характеристики – верхний  $X_{0i.max}$  и нижний  $X_{0i.min}$  уровни факторов, исходный уровень факторов  $X_{0i}$  (5.16), интервал варьирования  $\Delta X_{0i}$  (5.17) и заменим их соответствующими кодированными значениями –  $\bar{X}_{0i}$ ,  $\bar{X}_{i.max}$ ,  $\bar{X}_{i.min}$  (5.18), (5.19), (5.20), которые сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Основные характеристики плана эксперимента

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

Так как исследуемая зависимость (5.35) не является линейной, представим ее в виде квадратного полинома:

$$Y = A_0 + A_1 \bar{X}_1 + A_2 \bar{X}_2 + A_3 \bar{X}_3 + A_{11} \bar{X}_1^2 + A_{22} \bar{X}_2^2 + A_{33} \bar{X}_3^2 + A_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 + A_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_3 + A_{23} \bar{X}_2 \bar{X}_3, \quad (5.38)$$

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 (таблица 5.3), оценим точность и надежность измерений. Для этого воспользуемся теорией случайных ошибок [107]. Проведем анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов.

Разброс показателей измерения характеризуется величиной дисперсии  $\sigma^2$  и показателем вариации  $K_g$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_g)^2}{n-1}}; \quad (5.39)$$

$$K_g = \sigma / \bar{Y}, \quad (5.40)$$

где  $\bar{Y}_g$  – среднеарифметическое значение времени погружения стержня;  $n$  – количество параллельных измерений в одной серии экспериментов.

Малые значения показателя вариации  $K_g$  (таблица А1) свидетельствуют о достоверности значений измеренных величин. Кроме того, для повышения достоверности среднеарифметических значений выходной величины  $\bar{Y}$ , определяем доверительный интервал  $\mu$  значений  $Y_i$ , в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью:

$$\mu = \pm t\sigma, \quad (5.35)$$

где  $t$  – гарантийный коэффициент, который для данных экспериментов не должен превышать 4 [105]. Приняв  $t=3$ , определяем значение доверительного интер-

вала для каждой серии экспериментов. Полученные значения  $\mu$  сведены в таблицу А1.

Таблица 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 <sub>э</sub>				Урасч	$\Delta y$
							y <sub>э1</sub>	y <sub>э2</sub>	y <sub>э3</sub>	$\bar{y}$		
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

Убедившись в том, что все экспериментальные данные лежат в пределах доверительных интервалов, определим для квадратного полинома (5.32) коэффициенты регрессии по (5.1), (5.2) и (5.3).

Подставив рассчитанные коэффициенты в уравнение регрессии (5.32), получим:

$$A_y = 45,46 + 35,83 \bar{X}_1 + 37,8 \bar{X}_2 - 3,57 \bar{X}_3 + 32,587 \bar{X}_1 \bar{X}_2 - 4,88 \bar{X}_1 \bar{X}_3 - 3,68 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + 0,75 \bar{X}_1^2 + 6,95 \bar{X}_2^2 - 0,45 \bar{X}_3^2. \quad (5.36)$$

При сравнении результатов, полученных по регрессионному уравнению  $Y_P$  (5.36), с результатами экспериментальных исследований  $\bar{Y}_э$  установлено, что максимальное расхождение  $\Delta Y = \bar{Y}_э - Y_P$  составляет 7%. При этом может быть проведена проверка значимости коэффициентов уравнения (5.36) [50; 105]. С учетом рекомендаций, изложенных в [50; 105], получим, что влияние коэффициентов  $A_{11} = 0,75$  и  $A_{33} = -0,45$  на функцию отклика находится в пределах погрешности проведения эксперимента, поэтому незначимые коэффициенты исключаем из рассмотрения. Следовательно, после упрощения регрессионного уравнения (5.36) получим:

$$A_y = 45,46 + 35,83 \bar{X}_1 + 37,8 \bar{X}_2 - 3,57 \bar{X}_3 + \\ + 32,587 \bar{X}_1 \bar{X}_2 - 4,88 \bar{X}_1 \bar{X}_3 - 3,68 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + 6,95 \bar{X}_2^2. \quad (5.37)$$

Значения выходной механической энергии удара  $A_y$ , полученные по упрощенному выражению (5.37), удовлетворяют экспериментальным данным с погрешностью менее 9 %.

Для оценки соответствия экспериментальных данных теоретическим предпосылкам воспользуемся критерием согласия Фишера (5.18). По (5.16), (5.17) определим дисперсию адекватности  $D_a$  и дисперсию средних значений  $D_{cp}$  соответственно.

Критерий Фишера (5.18) показал, что полученный квадратный полином (5.37) адекватно характеризует искомую зависимость (5.29).

Коэффициенты регрессии (5.37) в кодированных единицах, вычисленные по результатам эксперимента, указывают на степень влияния факторов ( $C$ ,  $U$ ,  $z$ ) на выходной параметр ( $A_y$ ) и являются количественной мерой этого влияния.

Судя по коэффициентам регрессии уравнения (5.37), наибольшее влияние на энергию удара оказывают параметры емкостного накопителя. Так как при одновременном варьировании трех факторов пространственную фигуру построить невозможно, то один из факторов будем считать неизменным. Для варьируемых значений емкости накопителя  $C$  и напряжения его заряда  $U$  от «-1» до «+1» при неизменной жесткости пружины  $z$  построим поверхность отклика

$$A_y = f(C, U), \text{ при } z = \text{const}. \quad (5.38)$$

На рисунке 5.11 представлена пространственная поверхность исследуемой зависимости (5.44) в факторном пространстве, при значении жесткости пружины  $z$  на уровне «-1». Из диаграммы следует, что значение энергии удара  $A_y$  возрастает пропорционально емкости  $C$  промежуточного накопителя и квадрату напряжения  $U$  его заряда и достигает максимума, когда  $C$  и  $U$  находятся на уровне «+1» ( $C=0,13$  Ф,  $U=120$  В).

Фактором, обладающим вторым по значимости после параметров емкостного накопителя коэффициентом влияния в уравнении регрессии (5.43), является жесткость возвратной пружины  $z$ . На рисунке 5.12 представлена поверхность отклика в факторном пространстве  $A_y = f(U, z)$ , при значении емкости  $C$  на уровне «+1».

Наибольшее значение энергии удара  $A_y$  для рассмотренных поверхностей соответствует  $z=800$  Н/м при значениях остальных факторов на уровне «+1».

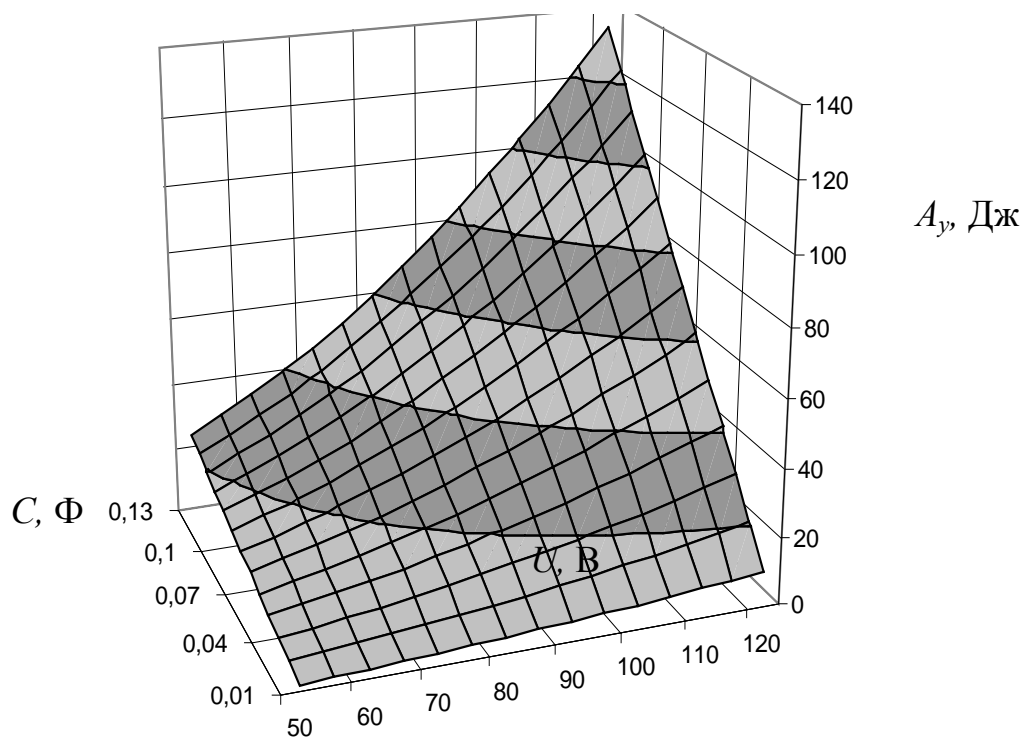


Рисунок 5.11 – Поверхность отклика  $A_y = f(U, C)$  при  $z$  на уровне «-1»

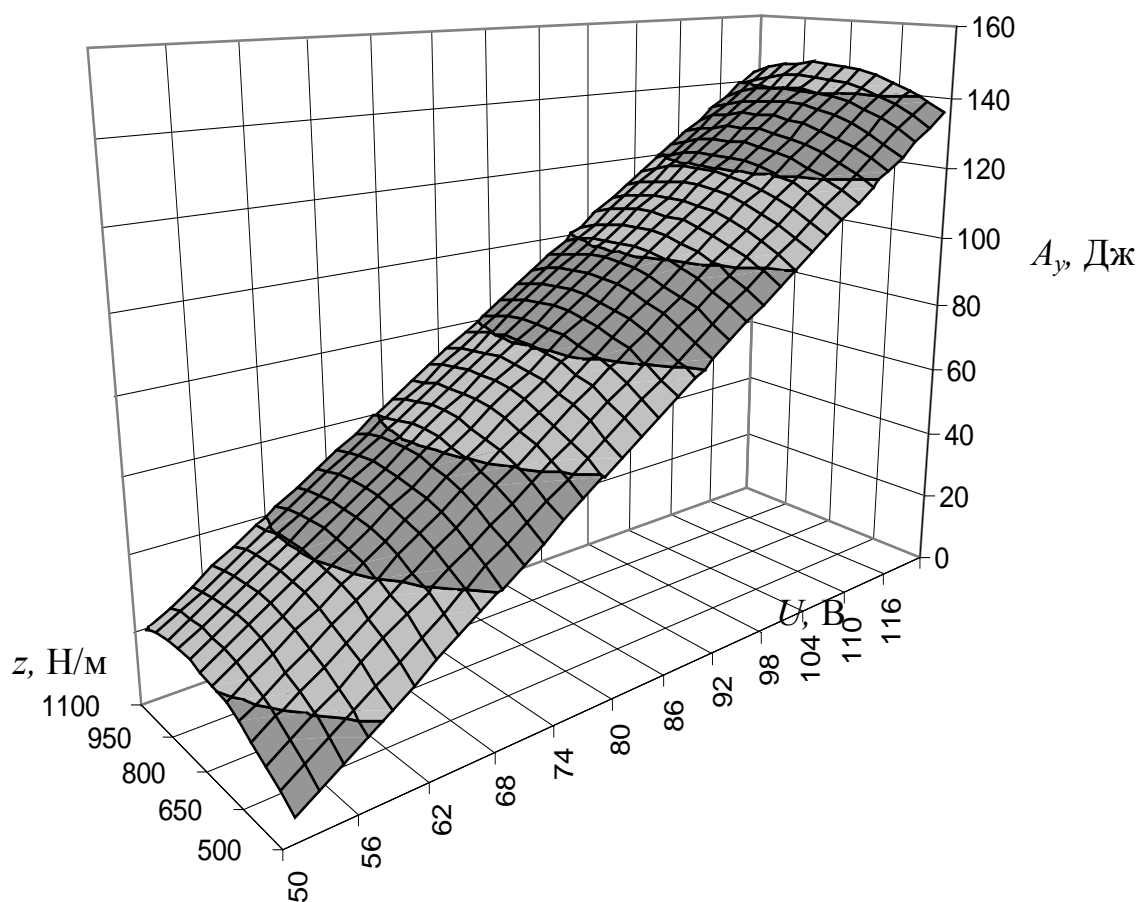


Рисунок 5.12 – Поверхность отклика  $A_y = f(U, z)$  при  $C$  на уровне «+1»  
( $C = 0,13$  Ф)

Снижение механической энергии удара  $A_y$  происходит при жесткости возвратного элемента  $z < 800$  Н/м либо  $z > 800$  Н/м. При значениях  $z > 800$  Н/м уменьшение значений  $A_y$  объясняется большими энергозатратами на деформацию пружины во время рабочего хода.

Выбор возвратной пружины с жесткостью  $z < 800$  Н/м также приведет к снижению  $A_y$  за счет уменьшения накопленного запаса энергии в магнитной системе ЛЭМД к началу рабочего хода.

Аналитическое исследование уравнения (5.43) на экстремум [107] показывает, что в выбранной области варьирования факторов экстремума нет. Поэтому предпочтительный режим работы УМ, обеспечивающий наибольшее значение энергии удара  $A_y$ , можно определить лишь по значениям коэффициентов в аппроксимирующем полиноме (5.43).

Для определения влияния параметров емкостного накопителя и жесткости возвратного элемента на частоту ударов после построения плана эксперимента (таблица 5.2), составления матрицы планирования (таблица 5.4), оценки точности и надежности измерений по (5.39), (5.40), (5.41) (таблица А2), находим коэффициенты регрессионного уравнения по (5.23), (5.24), (5.25), (5.26) и, подставляя их в аппроксимирующее выражение (5.38), с учетом проверки их значимости получим:

$$\begin{aligned} n = & 304 + 78 \bar{X}_1 + 45 \bar{X}_2 + 201 \bar{X}_3 + 18,75 \bar{X}_1 \bar{X}_3 + \\ & + 18,75 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + 70 \bar{X}_1^2 - 5 \bar{X}_2^2 - 5 \bar{X}_3^2. \end{aligned} \quad (5.45)$$

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 рисунке 5.13 представлена поверхность отклика  $n=f(C,U)$  при  $z$  на уровне «+1». Наибольшая частота ходов  $n$  бойка 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.

Таблица 5.4 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	C, Ф	U, В	z, Н/м	y <sub>э</sub>				Урасч	Δу
							y <sub>э1</sub>	y <sub>э2</sub>	y <sub>э3</sub>	$\bar{y}$		
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

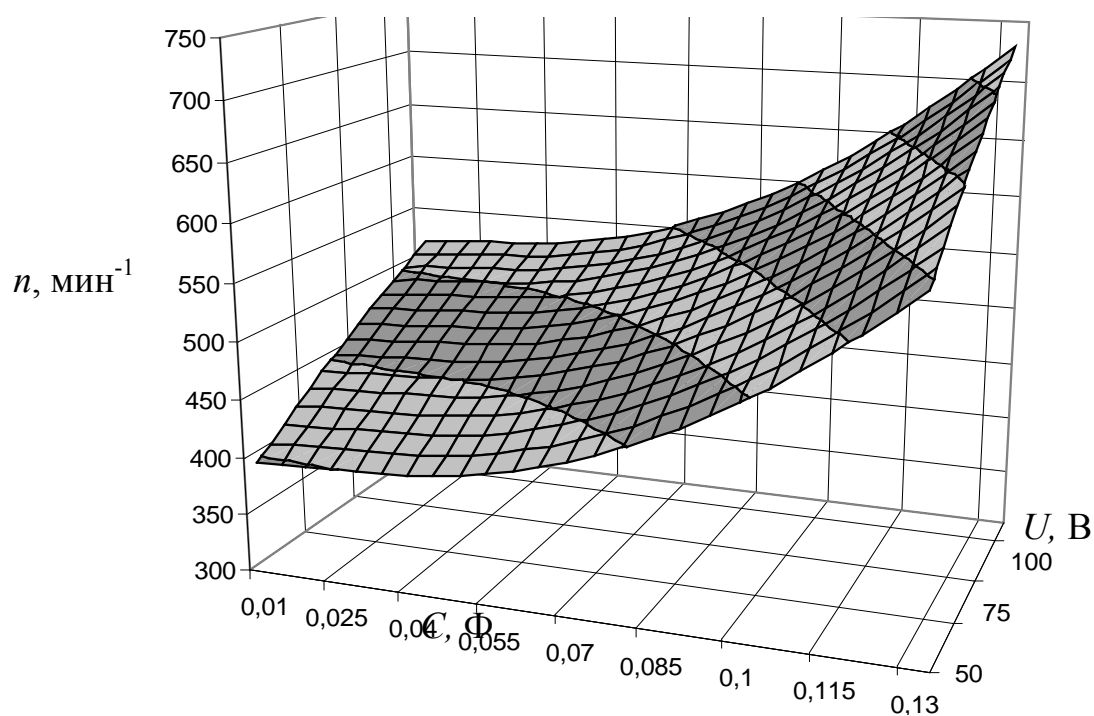
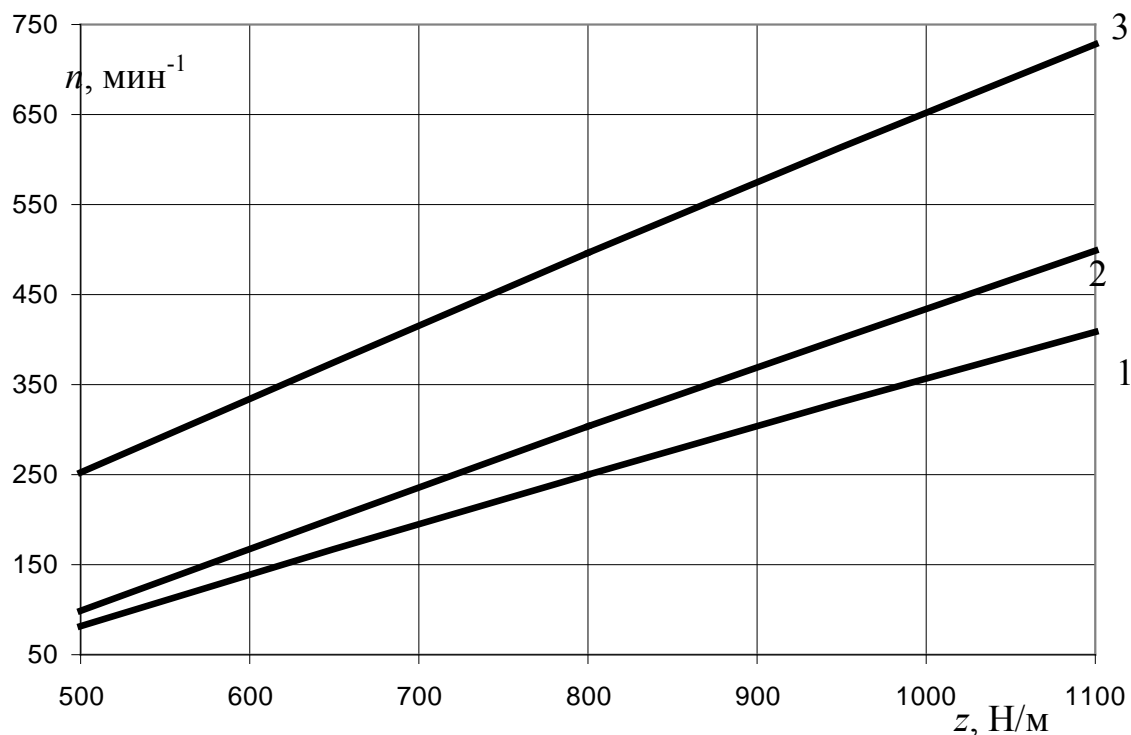


Рисунок 5.13 – Поверхность отклика  $n=f(C, U)$  при  $z$  на уровне «+1»  
( $z=1100$  Н/м)

По регрессионному уравнению (5.45) видно, что на частоту ударов  $n$  влияет жесткость возвратного элемента  $z$ . На рисунке 5.14 построены диаграммы из-

менения частоты ударов  $n$  электромагнитной машины от величины жесткости пружины  $z$  при различных уровнях остальных факторов ( $C$ ,  $U$ ).

Оценим влияние жесткости пружины  $z$  на частоту ударов  $n$  на уровнях «-1», «0», «+1» (рисунок 5.14).



1 –  $C$ ,  $U$  на уровне «-1»; 2 –  $C$ ,  $U$  на уровне «0»; 3 –  $C$ ,  $U$  на уровне «+1»

Рисунок 5.14 – Диаграммы изменения частоты ударов  $n$  электромагнитной машины от величины жесткости пружины  $z$

Частота ударов  $n$  электромагнитной машины пропорциональна  $1/t_u$ , где  $t_u$  – время одного цикла УМ, которое определяется как

$$t_u = t_{cp} + t_e, \quad (5.46)$$

где  $t_{cp}$  – время срабатывания якоря ЛЭМД (рабочий ход);  $t_e$  – время возврата якоря ЛЭМД (холостой ход).

Очевидно, чем короче время рабочего и холостого ходов якоря в течение цикла, тем выше значение  $1/(t_{cp} + t_e)$  и, следовательно, частоты ударов  $n$ .

При жесткости  $z$  на уровне «-1» ( $z=500$  Н/м) в пружине во время рабочего хода аккумулируется минимальный запас энергии, интервал времени возврата  $t_e$  при этом растягивается и может в 5...7 раз превышать продолжительность срабатывания  $t_{cp}$  [19]. В результате электромагнитная машина, оснащенная такой пружинной, обеспечивает слишком малую (90...120 мин<sup>-1</sup>) частоту ходов якоря.

Пружина жесткостью  $z$  на уровне «+1» ( $z=1100$  Н/м) оказывает на рабочем ходе слишком сильное противодействие перемещаемому полюсу якоря. Значи-

тельная энергия, запасенная в сжатой на рабочем ходе пружине, обеспечивает последующий быстрый и энергичный возврат бойка за время  $t_6 < t_{cp}$ .

Вследствие этого ЛЭМД, оснащенный жесткой пружиной, обладает значительным быстродействием и обеспечивает частоту ходов якоря  $n \geq 700$  мин<sup>-1</sup>. При этом на обратном ходе скорость  $V_o$  бойка близка к его предупредной скорости  $V_y$ , то есть  $V_y \approx V_o$ , что сопровождается соударения бойка 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<sup>-1</sup>) быстродействие ЛЭМД. Она обеспечивает соотношение между интервалами срабатывания и холостого хода в цикле, близкое к единице, то есть  $t_6/t_{cp} \leq 1,3$ .

Для определения экстремума после дифференцирования уравнения (5.45) по переменным  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$  и  $\bar{X}_3$  [107] 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 (5.45).

Для получения аналитической зависимости коэффициента полезного действия  $\eta$  от влияющих на него факторов ( $C$ ,  $U$ ,  $z$ ) построим матрицу планирования трехфакторного эксперимента (таблица 5.5), оценим точность и надежность измерений (таблица А3).

По рекомендациям, изложенным в подпункте 5.1 и в [104-107], определим зависимость (5.37):  $\eta=f(C, U, z)$ . После расчетов и несложных преобразований получим регрессионное уравнение:

$$\eta=25,6-0,4\bar{X}_1-1,2\bar{X}_3+3,5\bar{X}_1\bar{X}_3+3\bar{X}_2\bar{X}_3-7\bar{X}_1^2-3\bar{X}_2^2-4\bar{X}_3^2. \quad (5.47)$$

По регрессионному уравнению (5.47) оценим влияние емкости  $C$  промежуточного накопителя и напряжения его заряда  $U$  на КПД при условии  $z=const$  ( $z$  на уровне «0»). Для этого построим поверхность отклика  $\eta=f(C, U)$  при  $z$  на уровне «0» (рисунок 5.15), из которого видно, что наибольшее значение  $\eta$  достигается, когда  $C$  и  $U$  находятся на уровне «0». При увеличении напряжения  $U$  на интервале от «0» до «+1» ( $C=const$  на уровне «-1») КПД уменьшается. Это объясняется тем, что разряд конденсаторного накопителя на обмотку напряжением «+1» создает значительные скорости нарастания тока  $di/dt$  и магнитного потока  $d\psi/dt$  на этапе трогания якоря. Чем быстрее здесь возрастают ток и магнитный поток, тем больше наведенные вихревые токи и

меньше суммарное потокоцепление, что приводит к дополнительным потерям.

Таблица 5.5 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№ серии	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{X}_3$	C, Ф	U, В	z, Н/м	y <sub>э</sub>				У <sub>расч</sub>	Δу
							y <sub>э1</sub>	y <sub>э2</sub>	y <sub>э3</sub>	$\bar{y}$		
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

Увеличение емкости  $C$  промежуточного накопителя энергии в интервале варьирования от «0» до «+1» обеспечивает плавность разрядного процесса, однако 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».

Выбор накопителя энергии с емкостью  $C$  и напряжением  $U$  на уровне «–1» ( $C=0,01$  Ф;  $U=50$  В) также снижает  $\eta$ , что объясняется уменьшением энергии удара  $A_y$  за счет больших потерь при сжатии пружины.

На рисунке 5.16 представлена диаграмма изменения КПД в зависимости от величины жесткости пружины  $z$ , при  $C$  и  $U$  на уровне «0». Снижение  $\eta$  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 о наковальню 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.

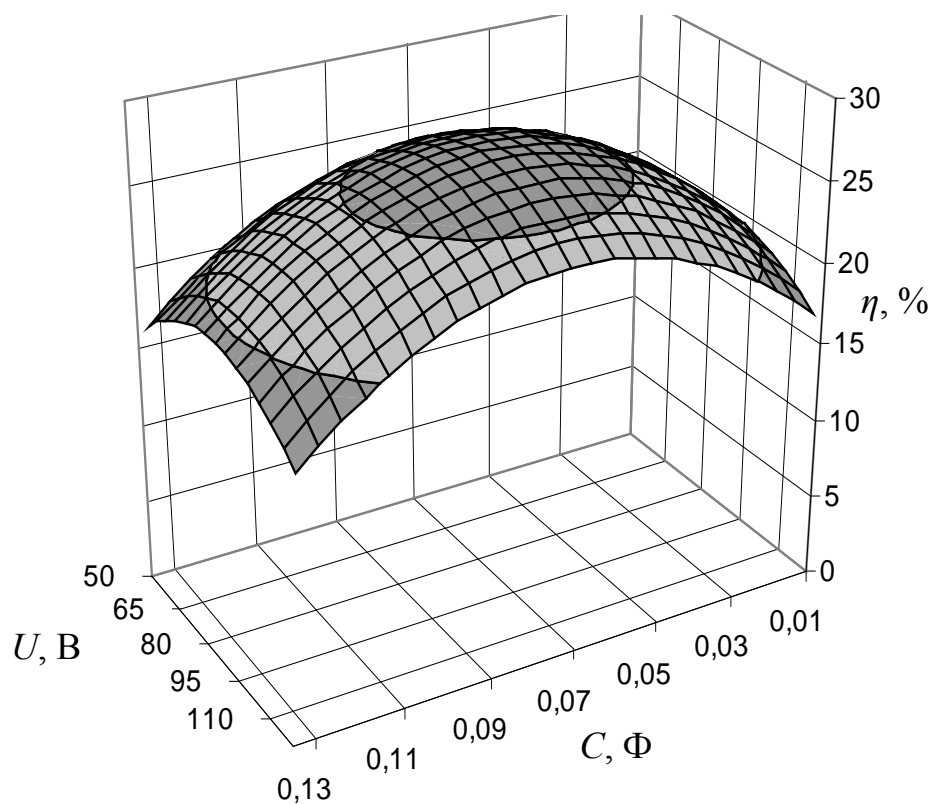


Рисунок 5.15 – Поверхность отклика  $\eta=f(C, U)$  при  $z$  на уровне «0» ( $z=800$  Н/м)

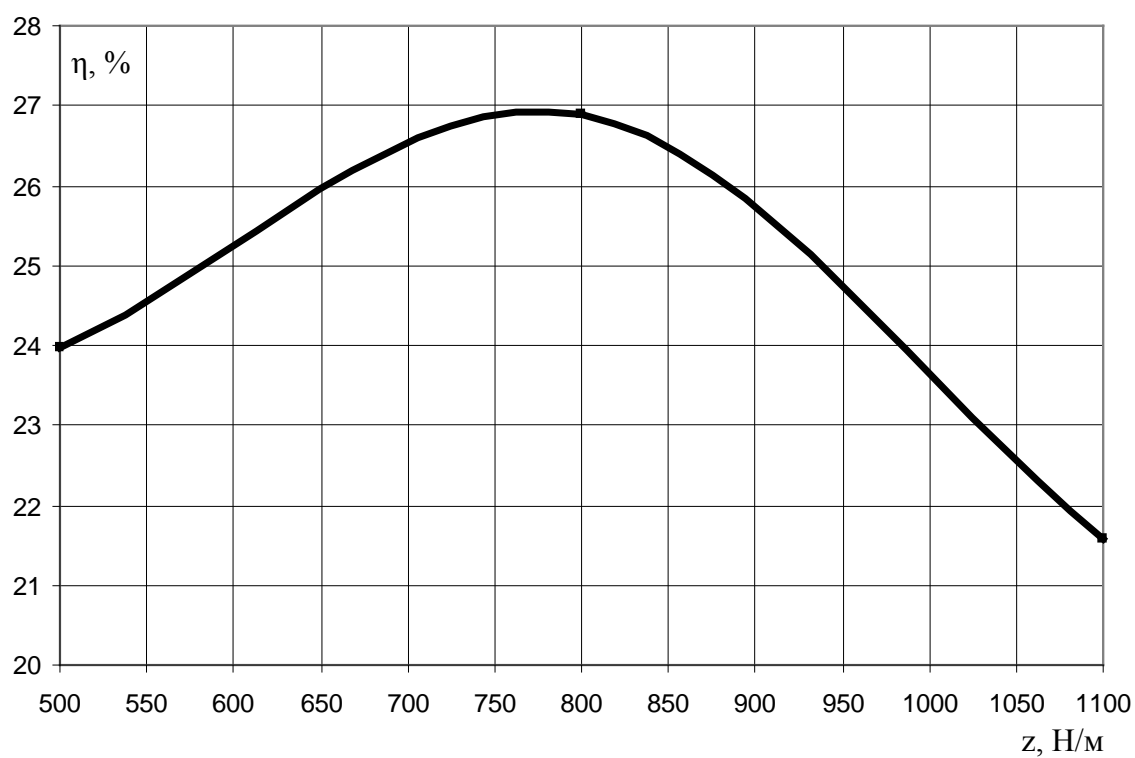


Рисунок 5.16 – Диаграммы изменения к.п.д. электромагнитной машины от величины жесткости пружины  $z$ , при  $C, U$  на уровне «0»

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 (5.13), тогда

$$A_y=4,4+722,3C+0,01U+15,5CU-0,089z; \quad (5.48)$$

$$n=466,7C-0,13U+0,447z+1,04Cz+19444C^2-2879,5; \quad (5.49)$$

$$\eta=3,94+123,4C+0,028z+0,19U+0,2Cz-2,9\cdot10^{-4}Uz- \\ -1944,4C^2-0,0024U^2-4,4\cdot10^{-5}z^2. \quad (5.50)$$

Зависимости (5.48), (5.49) и (5.50) 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 не только определить 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.

#### **5.4 Исследование энергопреобразования редкоударных машин с ЛЭМД, питаемых от емкостного накопителя**

Энергетические показатели ударных машин с ЛЭМД в значительной мере определяются интенсивностью накопления и эффективностью использования последующего взаимного превращения магнитной энергии в индуктивностях машины. Интенсивность накопления магнитной энергии неразрывно связана со способностью источника питания реализовывать большие мгновенные мощности в обмотке ЛЭМД, тем самым осуществляя форсированное энергопреобразование. В связи с этим представляет интерес исследование рабочего процесса ЛЭМД редкоударной машины (частота ходов якоря менее 1 Гц) с конденсаторным питанием и оценка влияния его свойств на режимы и эффективность цикла энергопреобразования [19].

Экспериментально установлено, что цилиндрические однообмоточные ЛЭМД сохраняют необходимую работоспособность в значительном диапазоне емкостей  $C$ , напряжений  $U$  и энергий  $W=0,5CU^2$  конденсаторного источника (КИ). Однако полнота импульсного преобразования энергии емкостного накопителя в механическую работу в таком ЛЭМД, зависящая от распределения подведенной за цикл энергии, при этом существенно меняется. Поэтому наиболее полная реализация потенциальных возможностей конденсаторного питания до-

стигается лишь при некотором согласовании разрядного процесса КИ с динамическими процессами в импульсном ЛЭМД.

Рассмотрим некоторые особенности энергопреобразования для согласованного и несогласованного разряда накопителя на обмотку двигателя, выявленные экспериментально.

Режим полагается согласованным, если значение энергии  $W_{ИСТ}$  и параметры  $C_H$ ,  $U_H$  подобраны так, что на интервале единичного срабатывания к моменту остановки якоря накопитель полностью разряжается и обеспечиваются максимальные выходные показатели ЛЭМД [19]. Для корректности сравнения влияние параметров  $C_H$ ,  $U_H$  накопителя на особенности энергопреобразования в ЛЭМД с заданными характеристиками оценивалось при неизменной начальной энергии в накопителе и варьируемых емкости и напряжении заряда –  $W_{ИСТ}=0,5CU^2=const$ ,  $C_H=var$   $U_H=var$ . Характерный вид временных диаграмм рабочего процесса ЛЭМД с конденсаторным питанием показан на рисунках 5.17, 5.18.

Разряд на обмотку ЛЭМД предварительно заряженной до напряжения  $U_H$  емкости  $C_H$  начинается в момент времени  $t=0$  (рисунки 5.17, 5.18). Уравнения электрического и механического равновесия, определяющие ток, напряжение и перемещение якоря ЛЭМД, имеют вид [50]:

$$U_H = Ri + d\Psi / dt; m(d^2x / dt^2) = F + F_f; F_f = (d \int id\Psi) / dx, \quad (5.51)$$

где  $U_H$  – напряжение накопителя;  $\Psi$  – потокосцепление ЛЭМД;  $F_f$ ,  $F$  – электромагнитная и противодействующая силы;  $x$  – координата якоря.

Энергетический баланс, питаемого однополярными импульсами электромеханического преобразователя, при пренебрежении потерями на трение и гистерезис на бесконечно малом интервале  $dt$  представим [24]:

$$dW_{ИСТ} = dW_{МАГ} + dW_{МЕХ} + dW_{ПР} + d\Delta W_M + d\Delta W_{СТ}, \quad (5.52)$$

$W_{ИСТ}$  – энергия, поступившая от источника;  $W_{МАГ}$  – энергия магнитного поля ЛЭМД;  $W_{МЕХ}$  – механическая энергия якоря ( $W_{МЕХ}=A_y$ );  $W_{ПР}$  – энергия на деформацию пружины;  $\Delta W_M$  – потери в меди;  $\Delta W_{СТ}$  – потери в стали.

При неизменной вводимой из КИ в ЛЭМД энергии  $W_{ИСТ}$  и варьируемых параметрах  $C_H$ ,  $U_H$  накопителя эффективность цикла энергопреобразования и выходные показатели импульсной машины будут определяться слагаемыми  $\Delta W_M$  и  $\Delta W_{СТ}$ .

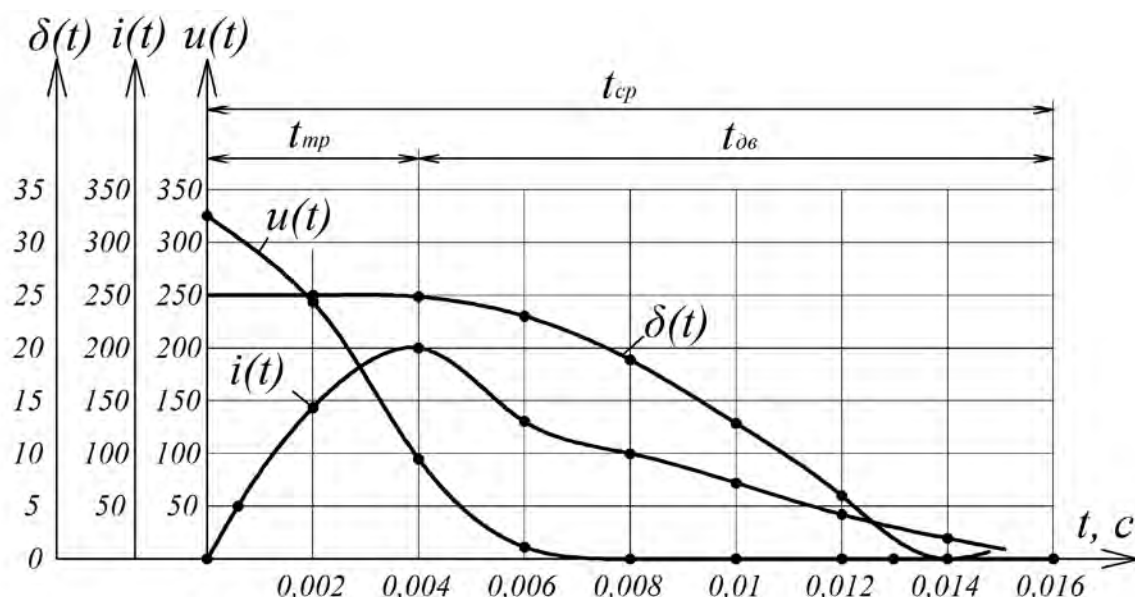


Рисунок 5.17 – Динамические характеристики ЛЭМД при конденсаторном питании ( $C=0,1C_H$ );  $\delta=r_1$

Наглядное представление о влиянии параметров и условий разряда КИ на обмотку и перераспределение слагаемых (5.52) в сравниваемых циклах энергопреобразования ЛЭМД дают энергетические диаграммы, построенные в осях  $\Psi$ - $i$  «потокосцепление-ток» (рисунок 5.19).

Площади, ограниченные замкнутыми кривыми  $\Psi_d(i)$ , полученными обработкой динамических характеристик ЛЭМД, пропорциональны энергии, израсходованной двигателем на полезную работу, и все потери, кроме тепловых в обмотке. Площади, ограниченные диаграммами  $\Psi_c(i)$ , найденными совместной обработкой динамических характеристик и статических кривых намагничивания электромагнита  $\Psi_i = f(i)$ ,  $\delta_i = \text{const}$ , пропорциональны полезной работе преобразователя в отсутствие потерь [24]. Совмещенные диаграммы  $\Psi_d(i)$  и  $\Psi_c(i)$  удобны при оценке влияния потерь на рабочий процесс ЛЭМД, а площадь между кривыми  $\Psi_d(i)$  и  $\Psi_c(i)$  позволяет судить об эффективности энергопреобразования в двигателе при варьировании значений емкости  $C_H$  и напряжения  $U_H$  КИ.

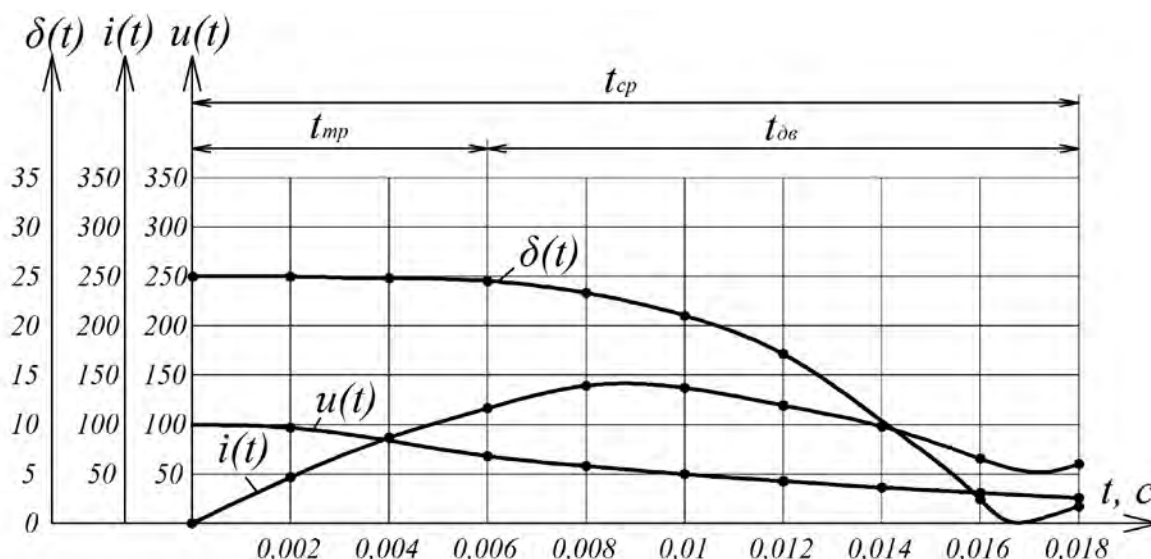


Рисунок 5.18 – Динамические характеристики ЛЭМД  
при конденсаторном питании ( $C=C_H$ );  $\delta=r_l$

Сравнение характеристик показывает, что процесс взаимных превращений при передаче одной и той же энергии из КИ в ЛЭМД существенно зависит от соотношения параметров  $C_H$ ,  $U_H$  накопителя. В частности, разряд на обмотку накопителя с малой емкостью  $C_H$  и повышенным напряжением  $U_H$  создает значительные скорости  $di/dt$  и  $d\psi/dt$  на этапе трогания якоря. Чем быстрее здесь возрастают ток и магнитный поток, тем больше наведенные вихревые токи, меньше суммарное потокоцепление и тем ниже относительно статической кривой  $\Psi_c(i)$  располагается динамическая кривая намагничивания  $\Psi_d(i)$  (рисунок 5.19).

Увеличение емкости и некоторое уменьшение напряжения на зажимах накопителя обеспечивают плавность разрядного процесса, снижение потерь в двигателе и повышение его выходных показателей в 1,5...1,65 раза (таблица 5.6).

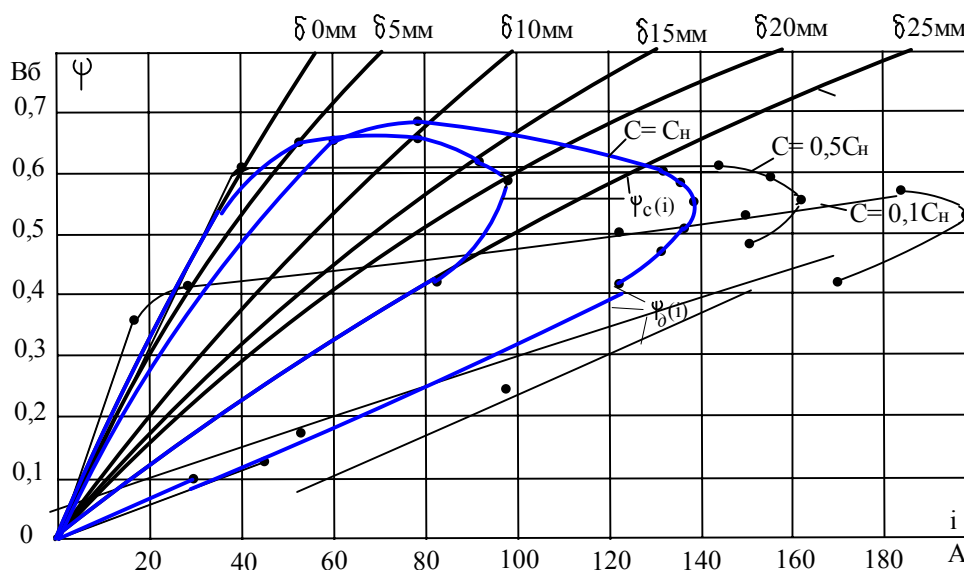


Рисунок 5.19 – Энергетические диаграммы ЛЭМД  
при конденсаторном питании

Таблица 5.6 – Энергетические показатели ЛЭМД при конденсаторном питании ( $C_H=0,02 \text{ Ф}$ )

Цикл	Механическая энергия, $A_v$	Остаточная магнитная энергия, $W_{MO}$	Потери в стали, $W_{CT}$	Коэффициент остаточной магнитной энергии, $K_o$	Магнитный КПД, $\eta_m$
$C=0,1C_H$	Дж	Дж	Дж	о.е.	о.е.
	14	4,0	30	0,2	0,8
$C=0,5C_H$	20	12	27	0,36	0,65
$C=C_H$	23	21	20	0,48	0,52

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования рабочих процессов ЛЭМД с выходной механической энергией 25 Дж, питаемого от КИ с емкостью  $C_H=0,02 \text{ Ф}$ , напряжением заряда до 150 В позволяет сделать следующие выводы:

- 1 Импульсные источники с электрическими конденсаторами суммарной емкостью 0,02 Ф или более, напряжением заряда до 150 В представляются вполне эффективными для питания сводообрушителей с ЛЭМД с выходной механической энергией от 25 Дж и более. Принятая емкость накопителя позволяет непосредственно согласовывать продолжительность разрядного процесса и рабочего хода якоря ЛЭМД, а выбранное начальное напряжение заряда обеспечивает электробезопасность ударной машины.
- 2 Цикл энергопреобразования броневого цилиндрического однообмоточного ЛЭМД со сплошным магнитопроводом критичен к параметрам емкостного накопителя и для повышения эффективности за счет согласования разрядного процесса с динамическими в нагрузке необходим их соответствующий выбор. При одинаковых начальных условиях двигатель, питаемый от накопителя с емкостью  $C=0,1C_H$ , имеет в 1,64 раза меньшую механическую энергию на выходе, в 1,5 раза большие потери в стали, однако обладает более высоким быстродействием и эффективнее по реализации накопленной магнитной энергии, что исключает необходимость гашения поля и рекуперации и упрощает схему источника питания.

### 5.5 Влияние конструктивных параметров ЛЭМД на эффективность энергопреобразования и выходные показатели

В главе 2 показано, что в статическом режиме работы на выходные показатели ЛЭМД непосредственное влияние оказывают конструктивные параметры двигателя: форма якоря и величина его рабочего хода. Однако для статического

режима характерно отсутствие противо-ЭДС, возникающей при интенсивном изменении тока и движении якоря и оказывающей непосредственное влияние на показатели машины. Поэтому важно уточнить показатели статических режимов, оценив влияние конструктивных параметров ЛЭМД на эффективность его рабочего цикла. Сравним силовые и энергетические показатели, которые в динамических режимах обеспечивают ЛЭМД с цилиндрическим втягивающимся или комбинированным якорем, питаемые от импульсных источников с емкостными накопителями электрической энергии.

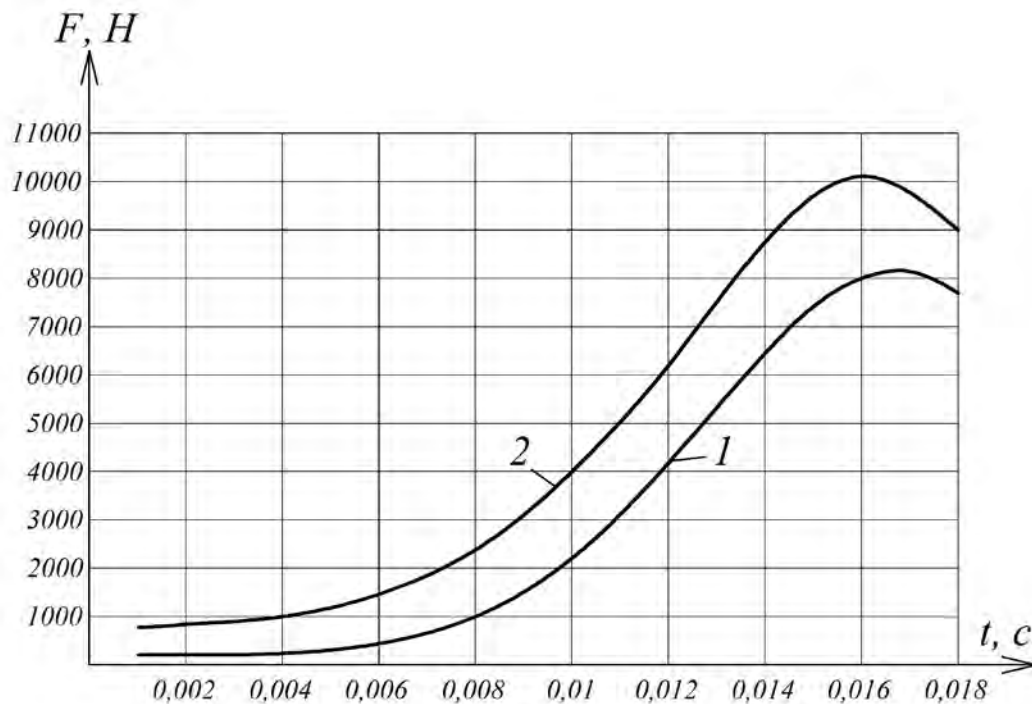


Рисунок 5.20 – Динамические тяговые характеристики ЛЭМД с втяжным (1) и комбинированным (2) якорем

Для сравниваемых ЛЭМД известными методами получены и обработаны динамические характеристики  $u(t)$ ,  $i(t)$ ,  $\delta(t)$ . На рисунке 5.20 показаны, полученные по результатам их обработки, динамические тяговые характеристики ЛЭМД с втяжным – 1 и комбинированным якорем – 2. Из рисунка следует, что по силе тяги ЛЭМД с втяжным якорем существенно уступает ЛЭМД с комбинированным якорем, что является следствием ухудшения его показателей.

Таблица 5.7 – Энергетические показатели ЛЭМД с увеличенным рабочим ходом

Цикл	Механическая энергия, $A_y$	Магнитный КПД, $\eta_M$	Начальная магнитная энергия, $W_{MH}$	Потери в меди $W_M$
$\delta = r_l$	Дж	о.е.	Дж	Дж
	23	0,52	25	34
$\delta = 1,5r_l$	29	0,77	43	82

При одинаковых начальных условиях двигатель с комбинированным якорем имеет бóльшую в 1,3-1,35 раз механическую энергию на выходе и обладает более высоким быстродействием.

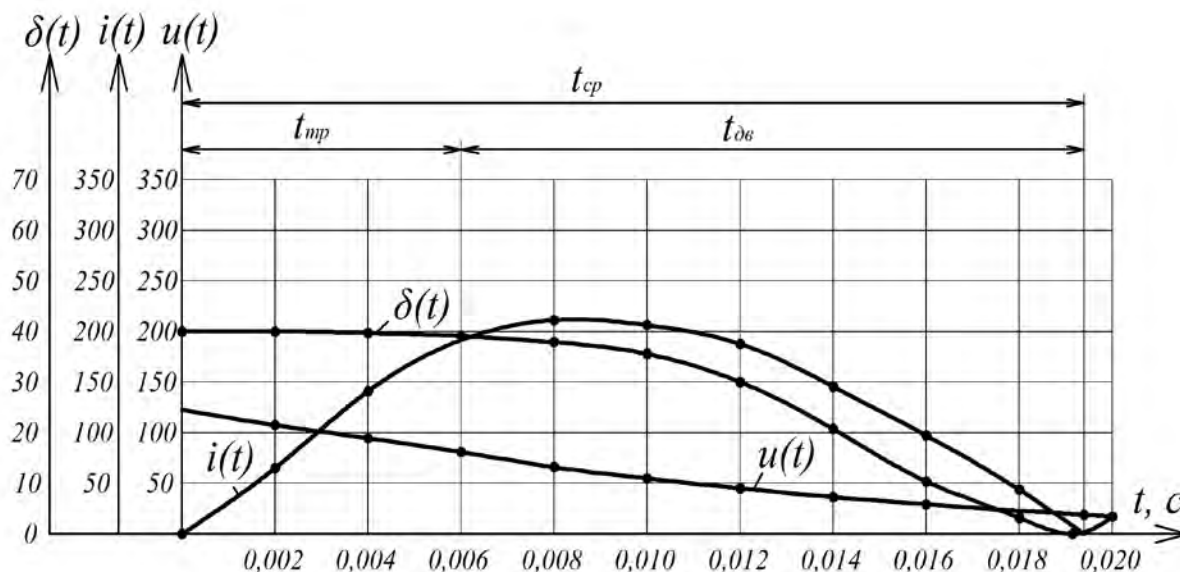


Рисунок 5.21 – Динамические характеристики ЛЭМД с комбинированным якорем;  $\delta=1,5r_1$

Рассмотрим влияние длины начального рабочего зазора и хода якоря на динамику и энергетические показатели ЛЭМД сводообрушителя при неизменной подводимой энергии  $W_{эл}$ , приходящейся на единицу объема  $V$  верхнего и нижнего рабочих зазоров  $W_{эл}/V=const$ .

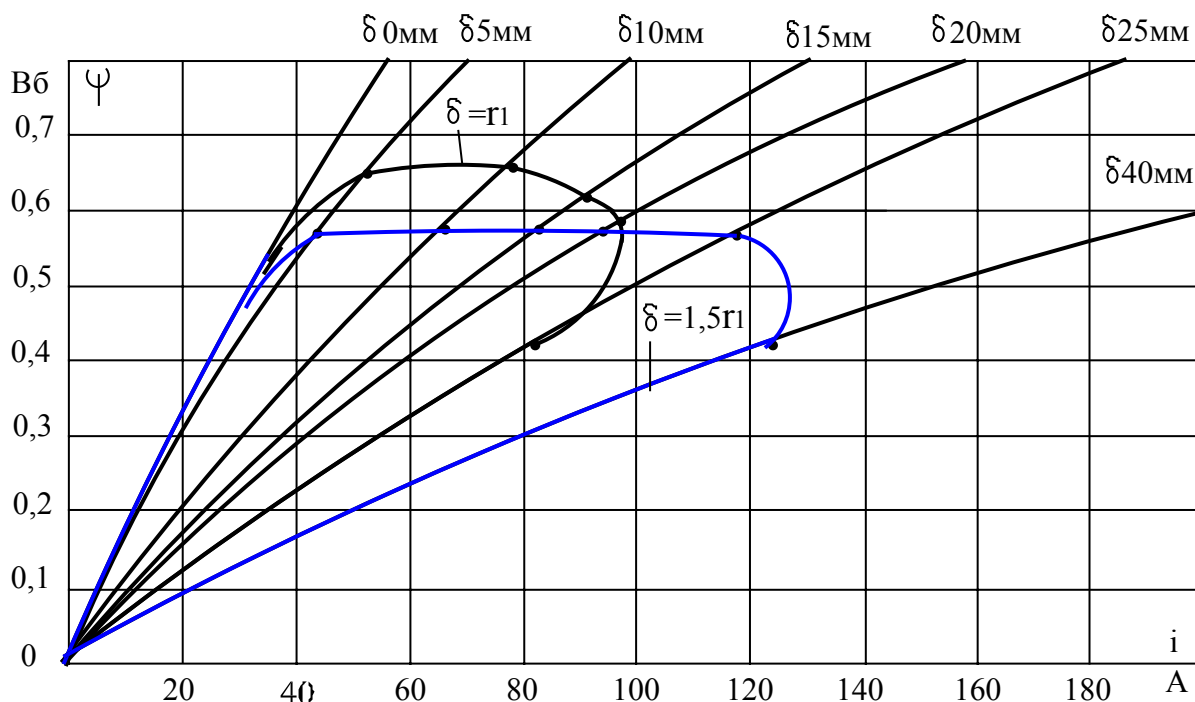


Рисунок 5.22 – Энергетические диаграммы ЛЭМД с различными рабочими зазорами

На рисунках 5.18, 5.21 показаны динамические характеристики ЛЭМД при  $\delta=r_l$  и  $\delta=1,5r_l$  соответственно, а на рисунке 5.22 представлены энергетические  $\psi-i$  диаграммы ЛЭМД, состоящие из линий динамического перехода и ограничивающих их статических характеристик намагничивания. Из полученных диаграмм определены энергетические показатели ЛЭМД (таблица 5.7).

Сопоставление показывает, что ЛЭМД с увеличенным рабочим зазором при  $\delta=1,5r_l$  имеет увеличенные в 1,3 раза механическую энергию на выходе, в 1,5 раза магнитный КПД и в 1,7 раза начальную магнитную энергию. Однако при  $\delta=1,5r_l$  несколько снизилось быстродействие и в 2,3...2,5 раза увеличились потери в меди, что необходимо учитывать в ЛЭМД ударных машин с большой частотой ходов. Для ЛЭМД, где реализуется одно- и редкоударный режим работы, такое увеличение является вполне допустимым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлены некоторые результаты создания и практического применения систем с импульсными электромагнитными машинами в операциях и процессах, выполняемых в различных отраслях, в том числе на объектах сельхозпроизводства и предприятиях АПК.

Обоснована и подтверждена в воплощенных конструкциях возможность использования дискретных линейных электромагнитных двигателей в реализации некоторых импульсных технологий взамен традиционных устройств с пневмо– и гидроприводом. Предложена новая конструкция броневого цилиндрического ЛЭМД, оснащенная сквозным осевым каналом, интегрированным зажимным механизмом, обладающая приемлемыми удельными показателями, позволившая расширить функциональные возможности и области эффективного применения систем с электромагнитными машинами. Повышение выходной механической работы и КПД ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами за счет увеличения значения запасаемой на этапе трогания якоря магнитной энергии позволило создать наряду со стационарными импульсные ударные машины переносного исполнения, питаемые от автономных источников ограниченной мощности.

Проведенный анализ рабочих циклов ЛЭМД, в том числе моделей тепловых процессов, представляющий особый интерес для форсированного режима энергопотребления переносных машин с автономным питанием, позволил определить особенности нагревания элементов двигателя, сформулировать рекомендации по улучшению теплоотведения и увеличению продолжительности их непрерывной работы.

По результатам проведенных исследований предложены системы и машины с ЛЭМД, улучшающие условия и производительность труда, уровень и культуру производства, позволяющие снизить потребление электроэнергии, эксплуатационные расходы, уменьшить потребные площади производственных помещений.

Последующее выявление существенных потенциальных возможностей систем с дискретными импульсными ЛЭМД может быть связано с развитием результатов, представленных в работе, и с формулированием и решением новых задач, определяемых уровнем областей их возможного применения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Архипенко, А. П. Гидравлические ударные машины [Текст] / А. П. Архипенко, А. И. Федулов. – Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1991. – 107с.
- 2 Горбунов, В. Ф. Ручные пневматические молотки [Текст] / В. Ф. Горбунов, В. И. Бабуров и др. – М. : Машиностроение, 1967. – 184 с.
- 3 Горбунов, В. Ф. Импульсный гидропривод горных машин [Текст] / В. Ф. Горбунов, А. Г. Лазуткин, Л. С. Ушаков. – Новосибирск : Наука, 1986. – 198 с.
- 4 Ашавский, А. М. Силовые импульсные системы [Текст] / А. М. Ашавский, А. Я. Вольперт, В. С. Шнейнбаум. – М. : Машиностроение, 1978. – 200 с.
- 5 Богинский, В. П. Пневмоударные машины для погружения легких стержневых элементов [Текст] / В. П. Богинский, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 1981.– № 2.
- 6 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.
- 7 Смоляницкий, Б. Н. Создание кольцевых пневмоударных машин для забивания в грунт стержней и бурения геологоразведочных скважин [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. Н. Смоляницкий. – Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1988. – 42 с.
- 8 Динамическое зондирование грунтов в условиях БССР / РСН 62–87. – Минск, 1987.
- 9 Официальный интернет-портал Министерства сельского хозяйства России. URL : <http://www.mcsx.ru>.
- 10 Информационная система iElectro. URL : <http://www.iElektro.ru>.
- 11 Дубровский, А. А. Вибрационная техника в сельском хозяйстве [Текст] / А. А. Дубровский. – М. : Машиностроение, 1968. – 204 с.
- 12 Луковников, В. И. Электропривод колебательного движения [Текст] / В. И. Луковников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
- 13 Усаковский, В. М. Инерционные насосы [Текст] / В. М. Усаковский. – М. : Машиностроение, 1973. – 200 с.
- 14 Богомягих, В. А. Интенсификация разгрузки сельскохозяйственных бункеров в условиях сводообразования зернистых материалов [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Богомягих. – Зерноград, 1986.
- 15 Богомягих, В. А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов [Текст] / В. А. Богомягих. – Ростов н/Д. : Изд-во Ростовского университета, 1973 – 152 с.
- 16 Гячев, Л. В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах [Текст] / Л. В. Гячев. – М. : Машиностроение, 1968.
- 17 Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков. – М. : Машиностроение, 1977.

- 18 Кононов, Б. В. Классификация и анализ устройств для разрушения сводов кормов в емкостях [Текст] / Б. В. Кононов, А. Г. Тарасов // Механизация работ в животноводстве : сборник. – Саратов, 1975. – Вып. 43.
- 19 Волгин, А. В. Интенсификация разгрузки бункерных устройств за счет сводообрушения импульсными электромагнитными системами [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Волгин. – Саратов : ФГОУ ВПО СГАУ им. Н. И. Вавилова, 2005. – 23 с.
- 20 Турчанинова, Т. А. Предотвращение сводообразования в силосах [Текст] / Т. А. Турчанинова, А. И. Либкин // Хлебопродукты. – 2001. – № 9.
- 21 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.
- 22 Пневматические шаровые вибраторы. Новые строительные технологии. – URL : <http://www.penoisol.ru/vibr.htm>.
- 23 Варсанофьев, В. Д. Конструкция и параметры зарубежных пневматических вибраторов [Текст] / В. Д. Варсанофьев, О. В. Кузнецов. – М. : Недра, 1969.
- 24 Ряшенцев, Н. П. Электромагнитные прессы [Текст] / Н. П. Ряшенцев, Г. Г. Угаров, А. В. Львицын. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
- 25 Портал вибрационного оборудования ООО «Вибротехцентр – КТ». URL : <http://www.vibrocom.ru>.
- 26 РОСАТ Технологии дозирования. URL : <http://www.rosat.ru>.
- 27 Тютюкин, В. А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки налипшего оборудования от налипших материалов [Текст] / В. А. Тютюкин // Электротехника. – 2002. – №11.
- 28 Усанов, К. М. Электромагнитная ударная машина для предотвращения зависаний муки в металлических бункерах [Текст] / К. М. Усанов, Г. Г. Угаров, И. В. Трубенкова, К. Г. Иняев, А. В. Волгин // Прогрессивные технологии в обучении и производстве : материалы II Всероссийской конференции. – Камышин, 2003. – С. 365-366.
- 29 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 3 т. – М. : МЭИ, 2004. – Т.2. – С 70-71.

- 30 Усанов, К. М. Импульсная электромагнитная система для интенсификации разгрузки бункеров [Текст] / К. М. Усанов, А. В. Волгин // Материалы Международной научно-практ. конференции, посвящ. 70-летию со дня рожд. профессора А. Г. Рыбалко. – Саратов : ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2006. – Ч.IV. – С. 81-85.
- 31 Гордон, С. В. Заземляющие устройства в сельских электросетях [Текст] / С. В. Гордон // Техника в сельском хозяйстве. – 1973. – № 3.
- 32 Гордон, С. В. Монтаж заземляющих устройств [Текст] / С. В. Гордон. – М. : Колос, 1975. – 160 с.
- 33 Найфельд, М. Р. Заземление, защитные меры безопасности [Текст] / М. Р. Найфельд. – М. : Энергия, 1971.
- 34 Найфельд, М. Р. О сопротивлении повторных заземлений нулевого провода [Текст] / М. Р. Найфельд. – М. : Энергетик. – 1970. – № 8.
- 35 Каргин, В. А. Совершенствование технологии погружения продольно-неустойчивых стержневых элементов на объектах АПК использованием переносного импульсного электромагнитного привода [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Каргин. – Саратов : ФГОУ ВПО СГАУ им. Н. И. Вавилова, 2007. – 23 с.
- 36 Костылев, А. Д. Пневмопробойники в строительном производстве [Текст] / А. Д. Костылев, В. А. Григоращенко, В. А. Козлов. – Новосибирск : Наука, 1987. – 140 с.
- 37 Миклашевский, Е. П. Вибрационные строительные машины [Текст] / Е. П. Миклашевский, Н. Ф. Мельгунов. – М. : Профтехиздат, 1960. – 117 с.
- 38 Новожилов, Г. Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечномерзлых грунтах [Текст] / Г. Ф. Новожилов. – Л. : Стройиздат, Ленинград. отд-ние, 1987. – 112 с.
- 39 Нейман, В. Ю. Основы построения и развитие теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Ю. Нейман. – Новосибирск : НГТУ, 2004. – 34 с.
- 40 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.
- 41 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.
- 42 Малов, А. Т. Электромагнитные молоты [Текст] / А. Т. Малов, Н. П. Ряшенцев, А. В. Носовец, Г. Г. Угаров. – Новосибирск : Наука, 1979. – 269 с.

- 43 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.
- 44 Ряшенцев, Н. П. Электромагнитный привод линейных машин [Текст] / Н. П. Ряшенцев, В. Н. Ряшенцев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 153 с.
- 45 Ряшенцев, Н. П. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями [Текст] / Н. П. Ряшенцев, Г. Г. Угаров, В. Н. Федонин, А. Т. Малов. – Новосибирск : Наука, 1981. – 150 с.
- 46 Львицын, А. В. Разработка и исследование электромагнитных двигателей для прессового оборудования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Львицын. – Саратов, 1982. – 23 с.
- 47 Мошкин, В. И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с регулируемыми выходными параметрами [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Мошкин. – Новосибирск, 1992. – 19 с.
- 48 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.
- 49 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.
- 50 Усанов, К. М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием [Текст] : монография / К. М. Усанов, В. И. Мошкин, Г. Г. Угаров. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – 284 с.
- 51 Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики [Текст] / С. М. Тарг. – М. : Высшая школа, 1995. – 415 с.
- 52 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 : сб. науч. тр. – Саратов, 1979. – Вып. 124. – С. 77-85.
- 53 Ефимов, И. Г. Теория регулируемых линейных электромагнитных приводов и их применение в системах управления техническими объектами [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. Г. Ефимов. – СПб. : Санкт-Петербургский ГТУ, 1995. – 32 с.
- 54 Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы [Текст] / Б. В. Клименко. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
- 55 Коцюбинский А. И. Исследование энергетических особенностей и динамических режимов тяговых электромагнитов при их применении в качестве при-

- водов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Коцюбинский. – М. : МВТУ им Н. Э. Баумана, 1977. – 241 с.
- 56 Любчик, М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов [Текст] / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1974. – 392 с.
- 57 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.
- 58 Любчик, М. А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока / М. А. Любчик. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 224 с.
- 59 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.
- 60 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.
- 61 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.
- 62 Ряшенцев, Н. П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин [Текст] / Н. П. Ряшенцев, А. Н. Мирошниченко. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1987. – 160 с.
- 63 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 СГАУ. – 2005. – № 4. – С.51-54.
- 64 Усанов, К. М. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт [Текст] / К. М. Усанов, В. А. Каргин // Вестник СГАУ. – 2005. – № 3. – С.59-61.
- 65 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.
- 66 Гельфанд, Я. С. Выпрямительные блоки питания и зарядные устройства в схемах релейной защиты [Текст] / Я. С. Гельфанд. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.

- 67 Замятин, В. Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры [Текст] : справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – М. : Радио и связь, 1987. – 576 с.
- 68 Лабунцов, В. А. Виды коммутации в вентильных преобразователях [Текст] / В. А. Лабунцов и др. // Электротехника. – 1969. – №11. – С. 40-44.
- 69 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.
- 70 Багоцкий, В. С. Химические источники тока [Текст] / В. С. Багоцкий, А. М. Скундин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
- 71 Болотовский, В. И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов [Текст] / В. И. Болотовский, З. И. Вайсгант. – Л. : Энергоиздат, 1989. – 208 с.
- 72 Бухаров, А. И. Средства заряда аккумуляторов и аккумуляторных батарей [Текст] : справочник / А. И. Бухаров, И. А. Емельянов, В. И. Судаков. – М. : Энергоиздат, 1988. – 288 с.
- 73 Варыпаев, В. Н. Химические источники тока [Текст] / В. Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский. – М. : Высшая школа, 1990. – 240 с.
- 74 Буслаев, Г. Н. Оценка конденсаторных устройств запираания тиристоров [Текст] / Г. Н. Буслаев, Г. К. Шварц // Электричество. – 1968. – № 6. – С. 45-50.
- 75 Бут, Д. А. Накопители энергии [Текст] / Д. А. Бут, Б.Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
- 76 Здрок, А. Г. Выпрямительные устройства стабилизации напряжения и заряда аккумуляторов [Текст] / А. Г. Здрок. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 144 с.
- 77 Кремниевые управляемые вентили-тиристоры (Технический справочник) / пер. с англ. – М.-Л. : Энергия. – 1964. – 360 с.
- 78 Кублановский, Я. С. Тиристорные устройства [Текст] / Я. С. Кублановский. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
- 79 Павлов, В. Б. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока [Текст] / В. Б. Павлов и др. – Киев : Наукова думка, 1987. – 284 с.
- 80 Шопен, Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики [Текст] : учебник для вузов / Л. В. Шопен. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 586 с.
- 81 Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному [Текст] / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
- 82 Чиженко, И. М. Зарядные устройства емкостных накопителей энергии [Текст] / И. М. Чиженко, Г. С. Бердинских. – Киев : Наукова думка, 1980. – 152 с.

- 83 Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин [Текст] / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
- 84 Борисенко, А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах [Текст] / А. И. Борисенко, В. Г. Данько, А. И. Яковлев. – М. : Энергия, 1974. – 560 с.
- 85 Филиппов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах [Текст] / И. Ф. Филиппов. – М. : Энергия, 1974. – 384 с.
- 86 Филиппов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. Ф. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
- 87 Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1979. – 216 с.
- 88 Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков [Текст] / П. Сильвестер, Р. Феррари / пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 229 с.
- 89 Усанов, К. М. Исследование теплового процесса импульсного электромагнитного двигателя [Текст] / К. М. Усанов, В. А. Каргин, С. М. Зубарев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 5. – С.18-20.
- 90 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.
- 91 Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро [Текст] / В. И. Радин и др. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
- 92 Ильин В. А. Линейная алгебра и аналитическая геометрия [Текст] / В. А. Ильин, Г. Д. Ким. – М. : ТК Велби, Изд-во «Проспект», 2007. – 400 с.
- 93 Усанов, К. М. Импульсные электромагнитные двигатели в приводе в приводе оборудования пищевого производства [Текст] / К. М. Усанов, В. А. Каргин, С. М. Зубарев, А. В. Ивченко // Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы Межд. науч.-практ. конф. – Курск : Изд-во Курск.гос.с.-х.ак., 2010. – С.228-231.
- 94 Мошкин, В. И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели [Текст] : монография / В. И. Мошкин, В. Ю. Нейман, Г. Г. Угаров. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
- 95 Гальперин, Л. Г. Основы гидрогазодинамики [Текст] / Л. Г. Гальперин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 238 с.
- 96 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. – 2013. – № 1. – С.16-17.

- 97 ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: Версия 5.8. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2010. – 245 с.
- 98 Усанов, К. М. Классификация и анализ устройств для принудительного наполнения фаршем колбасных оболочек [Текст] / К. М. Усанов, В. А. Каргин, С. М. Зубарев // Технология и продукты здорового питания : материалы III международной науч.- практич. конференции / под ред. А.В. Голубева ; ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов : ООО Издательство «КУБиК», 2009. – С.148-152.
- 99 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 науч. практич. конференции. – Саратов : Изд-во «КУБиК», 2012. – С.268-272.
- 100 Львицын, А. В. Исследование энергетических характеристик приводных силовых электромагнитов цилиндрической структуры одного веса [Текст] / А. В. Львицын, Г. Г. Угаров, В. Н. Федонин // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах. – Саратов, 1978. – Вып.2. – С.21-24.
- 101 Сотская, Х. Н. Обработка результатов лабораторных измерений [Текст] / Х. Н. Сотская, А. С. Кузнецов. – Минск : Выш. шк., 1971. – 40 с.
- 102 Усанов, К. М. Преобразователь сигналов датчика предупредной скорости бойка импульсной ударной машины [Текст] / К. М. Усанов, В. А. Каргин // Вестник СГАУ. – 2007. – № 2. – С. 56-57.
- 103 Усанов, К. М. Особенности энергопреобразований электромагнитной ударной машины с конденсаторным питанием [Текст] / К. М. Усанов, А. В. Волгин, В. А. Каргин / Инновационные технологии в обучении и производстве : материалы III Всероссийской конференции. – Камышин, 2005. – Т.1. – С. 174-178.
- 104 Угаров, Г. Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями [Текст] : автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Г. Г. Угаров. – Новосибирск, 1992. – 45 с.
- 105 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976.
- 106 Кочинев, Ю. Ю. Техника и планирование эксперимента [Текст] / Ю. Ю. Кочинев, В. А. Серебренников. – Л. : ЛПИ, 1986. – 70 с.
- 107 Сиденко, В. М. Основы научных исследований [Текст] / В. М. Сиденко, И. М. Грушко. – Харьков : Выш. шк., 1977. – 200 с.
- 108 Финни, Д. В. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст] / Д. В. Финни. – М. : Наука, 1970. – 297 с.

- 109 Фридман, Б. Э. Переходные процессы при программируемом разряде ёмкостного накопителя энергии [Текст] / Б. Э. Фридман // Электричество. – 1989. – №12. – С. 36-41.
- 110 Фридман, Б. Э. Формирование импульса тока при программируемом разряде ёмкостного накопителя энергии [Текст] / Б. Э.Фридман // Электричество. – 1999. – №6. – С. 42-48.

## Приложение А

*Таблица А1– Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов*

№ серии	C, Ф	U, В	z, Н/м	Энергия ударов, A <sub>y</sub> , Дж	Среднее значение, A <sub>y</sub> , Дж	σ	K <sub>g</sub>	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

Таблица А 2 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	C, Ф	U, В	z, Н/м	Частота ударов, $n_y$ , об/мин	Среднее значение, $n_y$ , об/мин	$\sigma$	$K_\sigma$	$\mu$
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

Таблица А3 – Анализ случайных погрешностей в ходе экспериментов

№ серии	C, Ф	U, В	z, Н/м	КПД	Среднее зна- чение КПД	$\sigma$	$K_6$	$\mu$
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

Научное издание

Усанов Константин Михайлович  
Мошкин Владимир Иванович  
Каргин Виталий Александрович  
Волгин Андрей Валерьевич

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ  
И ПРИВОДЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

МОНОГРАФИЯ

Редактор Н.М. Быкова

---

Подписано к печати 25.06.15	Формат 60х84 1/16	Бумага 80 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ.л. 12,62	Уч. изд.л. 12,62
Заказ № 137	Тираж 100	

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.