



Егоров Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета. Основные научные интересы лежат в области математического моделирования и анализа процессов энергопреобразования в силовых электромагнитных импульсных систе-



Мошкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета. Научные интересы лежат в области анализа процессов энергопреобразования в электромагнитных двигателях, используемых в импульсных технологиях.

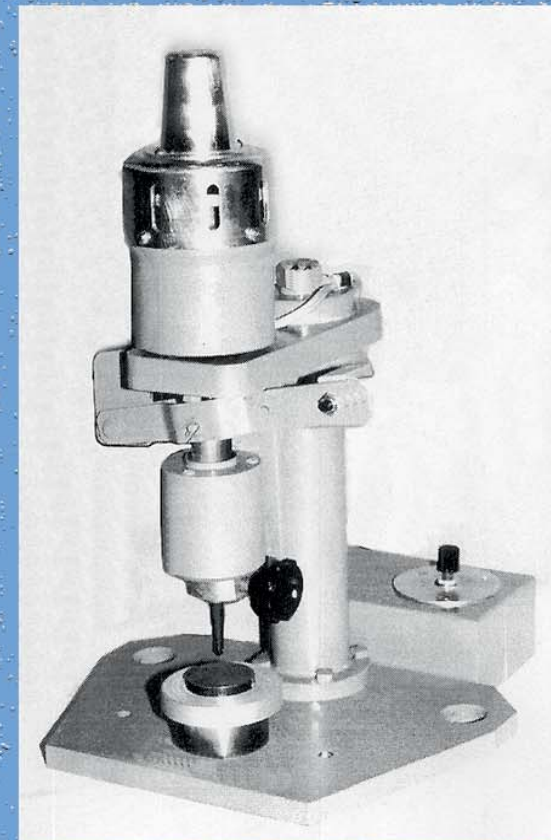


Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета. Научная деятельность связана с теорией и практикой импульсных электромагнитных машин ударного действия. Им создан первый электромагнитный молот и серия электромагнитных прессов.

А.А. Егоров, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

ИМПУЛЬСНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД УСТРОЙСТВ МАРКИРОВАНИЯ И КЛЕЙМЕНТА МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ

Монография



ISBN 978-5-4217-0065-4



9 785421 700654

Курганский
государственный
университет



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР
43-38-36

Министерство образования и науки Российской Федерации
Курганский государственный университет

А.А. Егоров, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

**ИМПУЛЬСНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД
УСТРОЙСТВ МАРКИРОВАНИЯ И КЛЕЙМЕНИЯ
МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ**

Монография

Курган 2010

УДК 621.318.3
ББК 31.261.3
Е30

Рецензенты

профессор кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» Курганской государственной сельскохозяйственной академии им. Т.С. Мальцева, доктор технических наук **В.И. Чарыков**;

заместитель директора по научной работе и инновационному развитию Курганского института железнодорожного транспорта, филиала Уральского государственного университета путей сообщения, действительный член Российской академии транспорта **В.В. Харин**.

Печатается по решению научного совета Курганского государственного университета.

Е 30 Егоров А.А., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Импульсный линейный электромагнитный привод устройств маркирования и клеймения мелкоразмерных деталей и изделий: Монография. - Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 136 с.

Книга посвящена вопросам создания оборудования для маркирования и клеймения деталей и изделий из тонколистового стального или цветного проката в приборостроительной, радиотехнической, электронной, часовой, местной и легкой отраслях промышленности, ювелирном производстве и других отраслях, в которых в качестве привода используются линейные электромагнитные двигатели. Особое внимание уделено повышению стабильности импульсной механической энергии воздействия на технологический объект. Определены основные параметры импульсного линейного электромагнитного двигателя и устройства питания. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований статических и динамических режимов и характеристик. Монография рассчитана на научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области новых систем электромагнитного привода и электрических машин.

Рис. – 45, табл. – 12, библиограф. – 127 назв.

ISBN 978-5-4217-0065-4

© Курганский государственный университет, 2010
© Егоров А.А., Мошкин В.И., Угаров Г.Г., 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА МАРКИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ	8
1.1. Операция маркирования как средство идентификации, учета и повышения качества продукции	8
1.2. Классификация методов маркирования.....	9
1.3. Диапазоны применяемых усилий в операциях механического маркирования и клеймения.....	17
1.4. Приводы устройств маркирования и клеймения	20
1.5. Сравнительный анализ линейных электрических приводов.....	29
1.6. Технологические основы применения силовой электромагнитной импульсной системы (СЭМИС) в операциях маркирования и клеймения.....	35
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЭМИС В УМК.....	39
2.1. Структура СЭМИС в УМК.....	39
2.2. Моделирование магнитных систем (МС) ЛЭМД для операций маркирования и клеймения методом конечных элементов.....	47
2.2.1. Постановка задач расчета стационарного электромагнитного поля в ЛЭМД.....	47
2.2.2. Сравнительный анализ МС ЛЭМД.....	50
2.2.3. Расчет осесимметричной МС ЛЭМД продольно-поперечного поля с учетом формирования требуемой тяговой характеристики..	55
2.3. Конструкции ЛЭМД для операций маркирования и клеймения.....	60
2.4. Схемы питания и управления ЛЭМД в приводе УМК.....	64
3. ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЛЭМД НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ СЭМИС.....	70
3.1. Влияние предыстории намагничивания магнитной системы ЛЭМД на его энергетические показатели	70
3.2. Экспериментальные исследования энергетических показателей ЛЭМД при различных состояниях МС	75
3.3. Способ повышения стабильности энергии удара в СЭМИС.....	76
3.4. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в СЭМИС.....	81
4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СЭМИС УМК.....	86
4.1. Определение оптимальных режимов энергопреобразования СЭМИС.....	86
4.2. Влияние параметров разрядного контура СЭМИС на характеристики импульса.....	95
4.3. Оптимизации питания СЭМИС методом планирования	

эксперимента	101
5. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СЭМИС В УМК.....	112
5.1. Методика расчета СЭМИС для технологических операций маркирования и клеймения.....	112
5.2. Определение емкости и числа гарантированных разрядных циклов конденсаторной батареи.....	119
5.3. Экономическая эффективность применения СЭМИС в операциях маркирования и клеймения.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128

ПРЕДИСЛОВИЕ

В машиностроительной, электротехнической, радиотехнической, приборостроительной, электронной, легкой и других отраслях, а также в ювелирном производстве широко распространены процессы маркирования и клеймения деталей и изделий.

Применение силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС) в составе импульсного линейного электромагнитного двигателя и устройства питания и управления для механизации и автоматизации указанных технологических процессов следует считать идеальным, так как параметры движения якоря двигателя и рабочего органа совпадают. В предлагаемой книге, являющейся составной частью работ по СЭМИС различного назначения (электроинструмент, прессы, молоты), отражены результаты работ авторов по созданию оборудования для маркирования и клеймения мелкоразмерных деталей и изделий в различных отраслях и производствах.

В первой главе обоснована актуальность создания и совершенствования оборудования для маркирования деталей и изделий на основе импульсного линейного электропривода, выявлены основные параметры и рассмотрены технологические основы применения СЭМИС в операциях маркирования и клеймения.

Вторая глава посвящена определению параметров СЭМИС в зависимости от метода маркирования и клеймения. Для операций маркирования и клеймения квазистатическим (силовым) методом предложен новый тип укороченной магнитной системы линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) с продольно-поперечным магнитным полем. Для ударного метода рекомендована укороченная магнитная система ЛЭМД броневого строения с комбинированным якорем и стопом.

Влияние предыстории намагничивания импульсных ЛЭМД на рабочие процессы СЭМИС рассмотрено в третьей главе. Исследования в этом направлении позволили решить задачу по повышению стабильности энергии удара технологических объектов малых размеров, в частности, в ювелирном производстве.

Вопросам оптимизации процессов энергопреобразования в СЭМИС посвящена четвертая глава. Установлены оптимальные значения параметров зарядно-разрядного контура СЭМИС, обеспечивающих максимальную эффективность энергопреобразования при заданных конструктивных параметрах ЛЭМД и величине воздушного зазора.

В пятой главе отражены вопросы расчета элементов СЭМИС – ЛЭМД, устройства питания и управления, приведена экономическая эффективность применения СЭМИС в операциях маркирования и клеймения.

Проф., д-р техн. наук Г.Г. Угаров

ВВЕДЕНИЕ

Процессы маркирования и клеймения широко распространены при производстве деталей и изделий в машиностроении, приборостроении, станкостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности. Связано это с тем, что современная продукция должна нести на себе определенную информацию: характеристику, материал, индекс, дату выпуска, порядковый номер, товарный знак изготовителя, клеймо годности и др.

С позиции комплексной автоматизации и механизации основного производства существует потребность в создании простого в эксплуатации и управлении привода для операций маркирования и клеймения, экономичного в части энергопотребления, с улучшенными массогабаритными характеристиками, а также выполнением технологических операций с точным дозированием энергии удара инструмента-бойка на обрабатываемую среду и возможности его регулирования в широких пределах. Технологические разработки, повышающие функциональность, мощность и одновременно сокращающие энергопотребление, а также снижающие стоимость продукта и необходимость технического обслуживания, привели к увеличению использования электроприводов во всех отраслях промышленности. От уровня развития технологии зависит качество и надежность изделий, их себестоимость и конкурентоспособность. На базе исследований по технико-экономическим, энергетическим и экологическим критериям к приводу устройств маркирования и клеймения (УМК) установлена существенная предпочтительность силовым электромагнитным импульсным системам (СЭМИС) на базе линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД).

В СЭМИС сочетается конструктивная простота, надежность и долговечность работы, экономичность, регулирование в широких пределах выходных характеристик. По сравнению с другими приводами СЭМИС более пригодны для привода устройств маркирования и клеймения ударного и квазистатического действия. СЭМИС относятся к импульсным электромеханическим преобразователям электромагнитного типа, обладающим рядом специфических свойств: ограниченностью механического перемещения, дискретным энергопреобразованием. Импульсный подвод энергии за счет интенсивности воздействия позволяет резко повысить ее плотность. Применение СЭМИС в операциях маркирования и клеймения следует считать идеальным, так как параметры движения двигателя и рабочих органов этих машин совпадают. СЭМИС, как правило, приспособлены к определенным приводным устройствам и должны часто изготавливаться в одном с ними блоке. Поэтому СЭМИС необходимо проектировать совместно с приводной рабочей машиной и системами питания и управления. Применение СЭМИС позволит обеспечить возможность легкой автоматизации и механизации технологических процессов маркирования и клеймения механическими методами, снизить материалоемкость и энергоемкость, повысить экологичность и надежность при функционировании.

Особенностью использования СЭМИС в технологических операциях маркирования и клеймения является обеспечение требования строго дозированных значений энергии воздействия на маркируемый материал детали или изделия. Существующий разброс величин энергии удара у известных прототипов СЭМИС является недопустимым в операциях маркирования и клеймения, а в некоторых случаях в прецизионных процессах маркирования, например, клеймение ювелирных изделий и пробирных игл, деталей в часовом производстве, приборостроении приводит к браку.

Для реализации ряда технологических операций маркирования и клеймения на основе СЭМИС необходимо обеспечить регулирование и стабильность энергии воздействия в заданных пределах, повышение удельных энергетических и силовых показателей, увеличение КПД.

При создании СЭМИС целесообразен комплексный подход – совместная разработка ЛЭМД, схемы питания и управления. В устройствах маркирования и клеймения на основе СЭМИС важным является вопрос создания экономичных, надежных и малогабаритных схем включения при питании от емкостного накопителя энергии и решение вопросов согласования характеристик источника питания и ЛЭМД.

Анализ энергоемкости различных импульсных технологических процессов показывает, что достигнутый и требуемый уровни удельной энергии удара в электромагнитных машинах ударного действия составляют: для ручных машин – 1... 3Дж/кг и 10...20Дж/кг соответственно, мощных молотов (до 30 кДж) – 2...6Дж/кг и 7...12Дж/кг, переносных СЭМИС (до 1кДж) – 2...5 Дж/кг и 8...15Дж/кг [4]. Это свидетельствует о необходимости поиска путей повышения удельных энергетических и силовых показателей импульсных ЛЭМД.

Применение СЭМИС в устройствах маркирования и клеймения обусловлено простотой их конструкции и эксплуатации, высокой надёжностью и производительностью, хорошей приспособляемостью для автоматического управления.

1. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА МАРКИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ

1.1. Операция маркирования как средство идентификации, учета и повышения качества продукции

Операции маркирования и клеймения деталей и изделий уверенно становятся ключевым средством идентификации и учета промышленной продукции на всех стадиях ее производства и последующего использования. Связано это с тем, что часто продукция должна нести на себе определенную информацию: характеристику, габариты, материал, индекс, дату выпуска, порядковый номер, товарный знак завода-изготовителя, клеймо годности, пробу благородного металла и др.

Номенклатура выпускаемых изделий с каждым годом расширяется, возрастают требования к качеству продукции. Потребности предприятий в нанесении маркировочных знаков опережают существующие возможности для обеспечения маркирования. В результате модернизации существующего оборудования появилось много прогрессивных приспособлений и устройств, позволяющих эффективно выполнять разнообразные маркировочные работы различной сложности с увеличением производительности труда.

Маркировка, характеризующая изделие, представляет собой определенную систему кодирования. Само изделие в этом случае можно рассматривать как носитель информации. Маркировка, или кодовое обозначение, изделия различна по своему составу. На практике применяют цифровую, буквенную, символическую, цветовую и смешанную знаковую кодировку.

В производственном цикле изделия проходят сложный технологический процесс изготовления, на этапах которого они подвергаются контролю на соответствие размерам и техническим условиям. В заключение операции контроля на изделие ставится клеймо годности. В массовом производстве используют специальные контрольные автоматы, при выходе из которых изделия должны подвергаться клеймению. При контроле дефектов металлов, полуфабрикатов и изделий обязательно вводят маркирование. С помощью счетно-решающих устройств и контрольно-следающих систем ведется непрерывное наблюдение за многочисленными параметрами, которые дают представление о ходе технологического процесса. Устройства маркирования, встроенные в поток, позволяют автоматически наносить информацию на изделия непосредственно в процессе производства.

Современные технологии в операциях маркирования и клеймения в состоянии открыть перед предприятием новые возможности по учету и идентификации продукции, совершенствованию логистики и автоматизации производственного процесса, оказать помощь в маркетинговых исследованиях. Современные системы промышленной идентификации и учета продукции дают

возможность интеграции маркировки с локальной сетью предприятия. Полученные данные о движении продукции на разных стадиях производственного процесса можно использовать для его совершенствования, реорганизации производственной структуры и т.д.

С позиции комплексной механизации и автоматизации основного производства наблюдается заметное отставание в области маркировочных операций. Одной из причин такого положения можно считать неправильный подход к вопросам маркирования и отнесение маркировочных операций к категории вспомогательных [18].

1.2. Классификация методов маркирования

В настоящее время получили распространение различные методы маркирования: механические, электрофизические, химические, адгезионные, невидимые и другие.

Для систематизации и упорядочения используемой терминологии в рассматриваемом технологическом сегменте целесообразно классифицировать известные методы маркирования по основному принципу воздействия на материал детали, полуфабриката или изделия (рис.1.1).

Рассмотрим и сопоставим из всей совокупности методов только те, которые позволяют осуществлять маркирование с получением оттисков или рельефа на поверхности деталей, изделий или полуфабрикатов.

Такие методы маркирования подразделяются на следующие группы.

1. Механические методы:

- a) ударный;
- b) маркирование давлением;
- c) маркирование накатыванием;
- d) маркирование гравированием (резанием).

2. Электрофизические методы:

- a) электроэрозионный;
- b) электроискровой;
- c) электроимпульсный;
- d) ультразвуковой;
- e) лазерный.

3. Химические методы

- a) электрохимический;
- b) травление без защиты поверхности;
- c) травление погружением защитной поверхности.

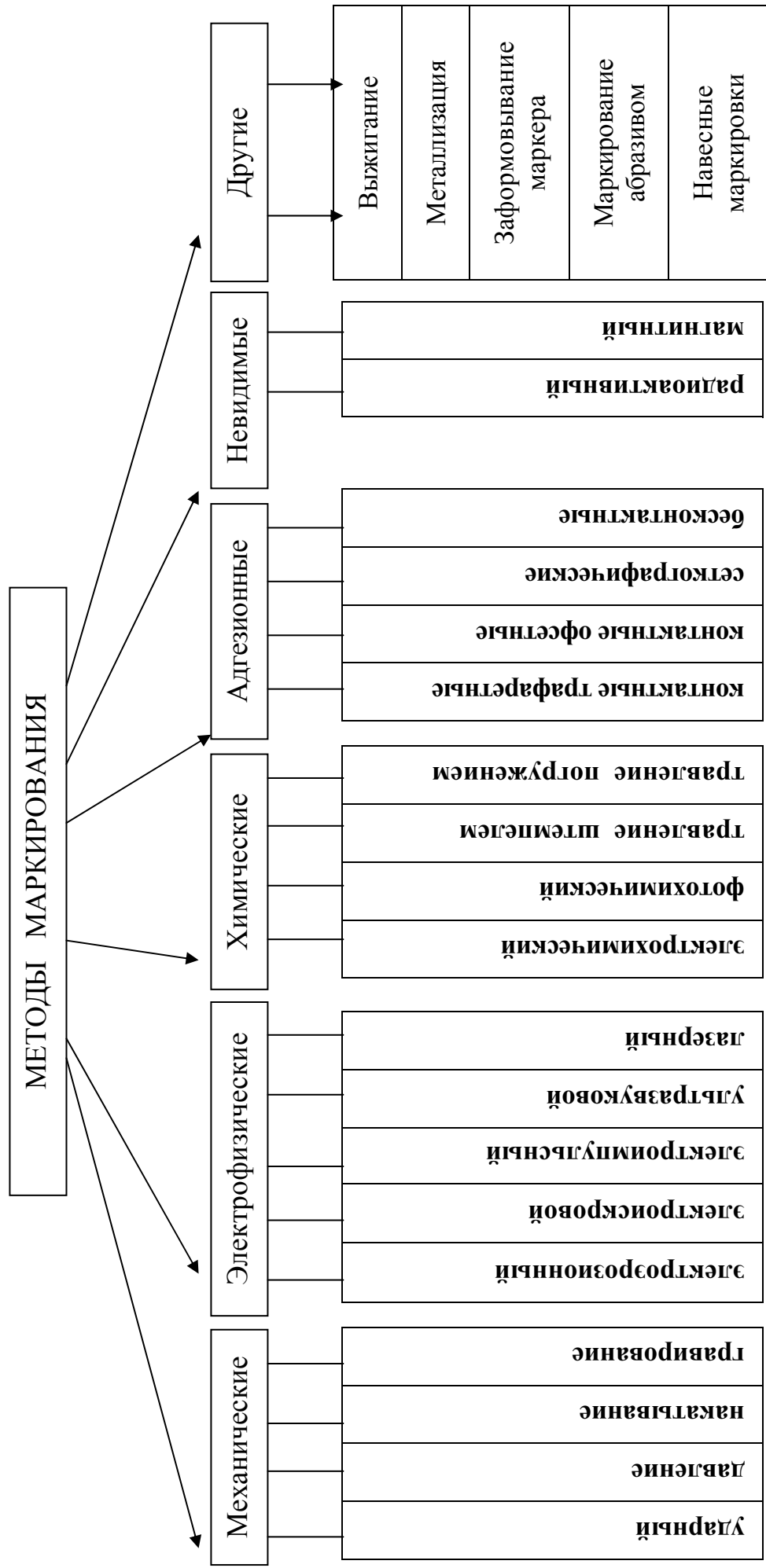


Рис. 1.1. Методы маркирования

Преимущества, недостатки и области применения рассматриваемых рельефных методов маркирования приведены в табл. 1.1.

Каждый из рассмотренных методов маркирования имеет свою область применения с учетом характерного воздействия на материал маркируемого объекта, а в отдельных случаях необходимо применять комбинированные методы маркирования. Например, электрохимикомеханическое маркирование, в котором совмещается электрохимическое анодное растворение металла с механическим абразивным съемом и механическим удалением продуктов реакции с обрабатываемой поверхности, применяется для маркирования твердосплавного инструмента [36].

Практическая реализация метода зависит от многих факторов. Однако из всех методов маркирования с получением оттисков на поверхности деталей и изделий такие механические методы, как ударный метод и маркирование давлением, являются наиболее простыми, экономически оправданными в массовой применимости, традиционными и доступными с высокой экологической чистотой процесса.

При помощи механических методов в машиностроении, в приборной и часовой промышленности, ювелирном деле клеймят и маркируют широкую номенклатуру деталей и изделий: прутки, трубы, различные полуфабрикаты, шасси, панели, изделия из листовых материалов, ювелирные изделия и др.

В механических методах маркирования происходит воздействие инструмента на маркируемый объект с получением оттиска на его поверхности. При этом возникает пластическая деформация металла, локальное уплотнение и некоторое его выпучивание вокруг контура знака. В тех случаях, когда маркирование должно осуществляться без заметной деформации и последующей обработки, нанесение знаков производят гравированием.

Рассмотрим каждый из приведенных выше методов.

1. Метод маркирования давлением (статический метод) основан на явлении деформации металла в результате внедрения рабочей части инструмента за счет постепенно возрастающего усилия.

Таблица 1.1

Сопоставление методов маркирования с получением оттисков на поверхности деталей и изделий

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
1. Механические методы (ударный, давление, накатывание, гравирование)	Простота, технологичность, широкая универсальность процессов, начиная от ручных способов и кончая полностью автоматизированными станками. Высокая производительность, возможность автоматической смены знаков и дистанционного управления. Возможность использования типового кузнечно-прессового и металлорежущего оборудования. Высокая долговечность наносимых знаков; возможность заполнения краской углубленных маркировок	Некоторая деформация, локальное уплотнение и концентрация напряжений в местах наносимых знаков. Затруднения в маркировании тонкостенных, высокоточных, твердых, хрупких материалов. Необходимость в специальном инструменте, изготовление которого составляет определенные трудности	Широкая номенклатура изделий различного назначения (шасси, панели, детали плоской, цилиндрической, конической и других форм). Механические методы широко распространены [13], [50], [18], [52], [21]
2. Электро-физические методы а) электро-эрозионный, электроискровой, электро-импульсный	Возможность обработки любых токопроводящих материалов независимо от твердости и прочностных свойств. Отсутствие силового воздействия позволяет маркировать тонкостенные и хрупкие изделия. Возможность использования типового электроэрозионного оборудования. Процесс поддается автоматизации	Маркирование только токопроводящих материалов. Быстрый износ инструмента. Сложность его изготовления. Тепловое воздействие при маркировании, образование дефектного слоя и его последующее удаление	Широкое распространение для нанесения делений, штрихов, шкал, маркировок на различных изделиях из твердых сплавов, легированных и других сталей, изготовление табличек [29], [32], [36]
б) ультразвуковой метод	Возможность обработки любых твердых материалов	Сложность и дороговизна оборудования, низкая производительность	Нанесение изображения на изделия из керамики, фарфора, германия, кварца и других материалов трудных в обработке. Метод имеет ограниченное применение [36], [37]

Продолжение табл. 1.1

<p>в) лазерный метод</p>	<p>Высокое качество и разрешение лазерного маркирования, бесконтактный способ маркирования исключает деформацию. Возможность маркирования металлов и неметаллов</p>	<p>Необходимость в специальном оборудовании и трафаретах; высокая сложность и стоимость оборудования</p>	<p>Клеймение ювелирных изделий, маркирование легковесных и тонкостенных изделий. Исползуется, где невозможно применить иные методы или получить желаемые декоративные, эстетические и другие эффекты [36], [37]</p>
<p>3. Химические методы а) травление без защиты поверхности б) травление погружением защитной поверхности</p>	<p>Широкая доступность методов. Возможность использования как кислотных, так и бескислотных растворов. Отсутствие силового воздействия на маркируемое изделие. Возможность получения вытравленного изображения (углубленных) или вытравленного фона (выпуклых)</p>	<p>Необходимость подготовки поверхности перед маркированием и дополнительной обработки ее после (промывка, пассивирование, стабилизация). Недостаточная прочность изображения. Утилизация отработанных реагентов. а) малая глубина наносимых знаков, недостаточная четкость и эстетичность маркировок. б) длительность и сложность процесса, потребность в травильных и других ваннах. Значительный расход защитных покрытий и химикатов. Возможность появления коррозии</p>	<p>Нанесение изображений на таблички, шкалы линейки, инструкции и другие изделия а) маркирование неответственных изделий б) нанесение маркировок со значительной плотностью знаков [25], [31]</p>
<p>3. Электрохимический метод</p>	<p>Возможность обработки любых металлов и сплавов, независимо от химического состава и структурного состояния, обработка не влечет за собой изменение структуры материала и деформаций. Возможность получения различных тонов, знаков плоской или углубленной формы. Хорошая износостойкость. Возможность автоматизации процесса</p>	<p>Сложность изготовления трафаретов, электродов. Необходимость применения специального оборудования. Утилизация отработанных электролитов</p>	<p>Применяется для различных изделий, режущего и измерительного инструмента [30], [31], [36], [37]</p>

При статических методах маркирования инструмент воздействует на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой, происходит плавное однократное обжатие обрабатываемой поверхности без перемещения очагов воздействия. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на процесс маркирования.

Возможность выдержки пуансона позволяет получать качественные оттиски значительной глубины. Получение рельефных знаков основано на явлениях течения металла, когда приложенное усилие превосходит его предел текучести, а также на способности металла заполнять впадины и углубления в пуансоне при значительных приложенных нагрузках [18, 28].

Статические методы, как правило, обеспечивают техпроцесс маркирования меньшей силой воздействия; с помощью ударных методов достигается большая степени упрочнения, которая характеризуется степенью повышения микротвердости, значениями сжимающих остаточных напряжений и толщиной упрочненного слоя [50, 51].

2. Ударный метод маркирования основан на явлении деформации металла в результате внедрения рабочей части инструмента под действием удара [18].

При ударных методах инструмент однократно воздействует на всю обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом сила воздействия F в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения F_i до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может (как и в статических методах) последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность.

Ударный способ маркирования по сравнению со статическим в зависимости от твердости обрабатываемого материала требует в 1,7–2,8 раза больше энергии [50, 34, 106]. Одна из причин этого заключается в том, что чем больше скорость нагружения, тем меньше время протекания пластического деформирования, а следовательно, выше напряжение, при котором происходит переход от упругого деформирования к пластическому. Например, для стали при увеличении скорости удара до 7-8 м/с динамический предел прочности обрабатываемого материала интенсивно возрастает, при дальнейшем увеличении скорости предел прочности изменяется незначительно [50].

Ударное маркирование определяется энергией удара E_u , прикладываемой к рабочему телу, и скоростью деформирования [13, 21]. Например, боек в момент удара помимо полезной работы деформирования затрачивает энергию на упругий отскок и на преодоление сил трения. Поэтому потенциальная энергия бойка при маркировании конструкционных сталей должна быть на 15–20 % больше полезной работы деформирования.

В соответствии со способом воздействия прилагаемого усилия на маркируемый материал детали или изделия из статического и ударного методов маркирования можно выделить смежные методы маркирования:

квазистатический и статико-импульсный (рис. 1.2).

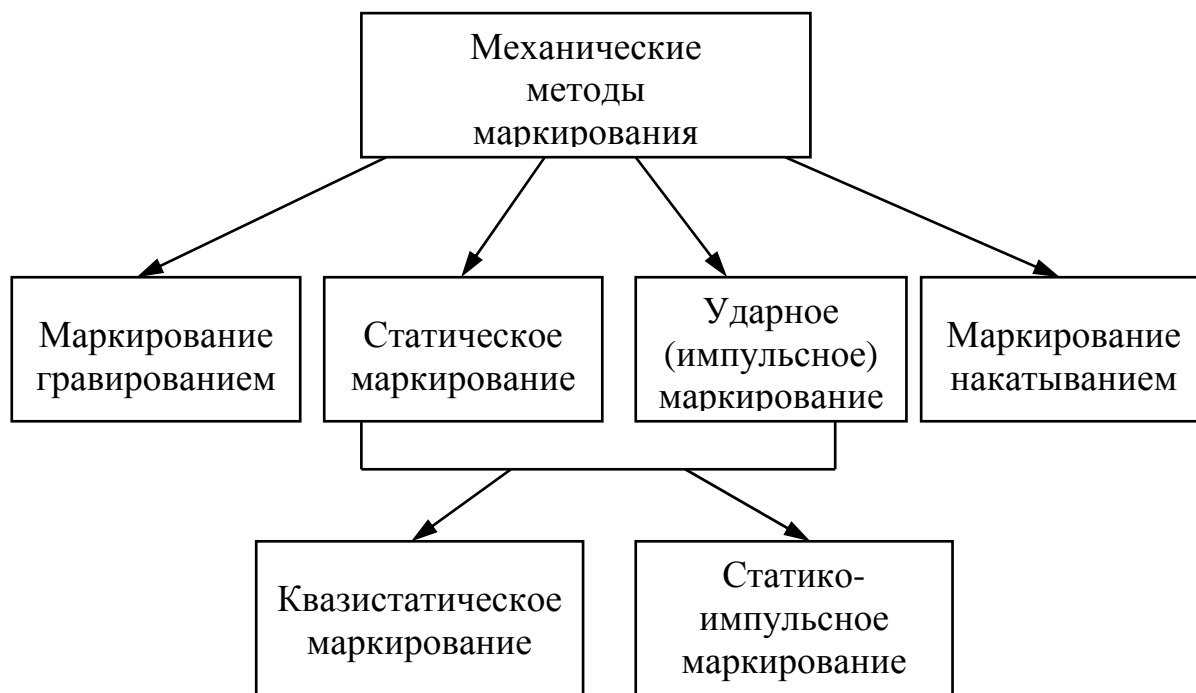


Рис. 1.2. Классификация механических методов маркирования

Квазистатический метод маркирования осуществляется при приложении значительных усилий и сравнительно небольших перемещениях рабочего инструмента. Выполнение операции происходит мягко, без удара в квазистатическом режиме. Используется в ряду технологических операций холодной штамповки: безударное клеймение и маркирование.

Статико-импульсный метод является разновидностью ударного метода – процесс упорядоченного ударного воздействия на маркируемую поверхность через заранее статически нагруженный инструмент. Технология статико-импульсного метода включает следующие этапы: предварительное статическое и последующее импульсное нагружение инструмента; выполняется специальными бойками с помощью механизированного инструмента [106]. Статико-импульсный метод является новым видом обработки материалов, отличающимся способом подвода энергии в зону деформации. Пластическая деформация металла осуществляется управляемым импульсным воздействием, сообщаемым ударной системой боек-волновод статически нагруженному инструменту. Использование предупредительного статического поджатия инструмента к обрабатываемой поверхности позволяет увеличить ее площадь контакта с инструментом, что способствует уменьшению искажений передаваемого ударного импульса и снижению потерь энергии удара. Преимущества перед другими способами маркирования: малая энергоемкость, высокий коэффициент передачи энергии обрабатываемой поверхности. Недостатки данного способа: повышенная стоимость, громоздкость оборудования.

3. Метод маркирования накатыванием основан на явлении деформации металла при накатывании инструмента на изделие, взаимодействии под давлением и перемещении одного относительно другого. Таким образом, вся маркировка одновременно не наносится, а прилагаемое усилие меньше, соответственно уменьшается деформация. Накатыванием можно маркировать как плоские, так и цилиндрические изделия. При этом плоские изделия маркируют накатным роликом или сектором, а цилиндрические — плоской плашкой или цилиндрическим роликом (сектором). Накатыванием можно получить четкий оттиск на трубчатых изделиях без деформации последних. В связи с этим накатывание является одним из прогрессивных методов маркирования [18].

4. Метод механической гравировки основан на механическом воздействии на маркируемую поверхность изделия резанием, заостренным стержнем (иглой), изготовленным из сверхтвердого сплава.

Технологические установки механической гравировки выпускаются в нескольких технологических модификациях в зависимости от принципа действия:

- системы гравирования механической маркировки поверхности колеблющейся иглой, в которой стержень внутри маркировочной головки совершает возвратно-поступательные движения. Совокупность точек воздействия составляет линию маркировки;
- системы гравирования механической маркировки поверхности неколеблющейся иглой, в которой стержень прижимается с некоторым усилием к маркируемой поверхности, перемещаясь, острие стержня формирует непрерывную линию маркировки.

Кроме того, гравированием доступно получать контуры любой конфигурации, товарные знаки или эмблемы без применения специальных пуансонов. В связи с этим гравировальное оборудование универсально, но производительность на нем невысокая. Получаемая маркировка характеризуется высоким качеством и стойкостью [18, 52]. При гравировании знаки получаются очень отчетливыми, но это весьма трудоемкий и дорогой для массового производства процесс. Поэтому на практике, где только имеется возможность, применяют механические методы маркирования, основанные на явлениях деформации металла в результате внедрения рабочей части инструмента под действием удара, постепенно возрастающего усилия или накатывания.

Анализ рассмотренных механических методов маркирования позволяет отметить их преимущества: простота; технологичность; широкая универсальность процессов, начиная от ручных способов и кончая полностью автоматизированными станками; высокая производительность; возможность автоматической смены знаков и дистанционного управления; возможность использования типового кузнечно-прессового и металлорежущего

оборудования; высокая долговечность наносимых знаков; возможность заполнения краской углубленных маркировок.

Недостатками механических методов являются: некоторая деформация; локальное уплотнение и концентрация напряжений в местах наносимых знаков; затруднение в маркировании тонкостенных, высокоточных, твердых, хрупких материалов; необходимость в специальном инструменте, изготовление которого составляет определенные трудности; слабая контрастность нанесенных знаков. Однако, несмотря на эти недостатки, механические методы более распространены по сравнению с другими.

Из методов механического маркирования наименьшей энергоемкостью, материалоемкостью наряду с высокой технологичностью процесса обладает ударный метод маркирования.

1.3. Диапазоны применяемых усилий в операциях механического маркирования и клеймения

Механическое маркирование и клеймение материала – сложный процесс, происходящий на различных масштабных уровнях. Поверхностный слой при обработке деталей в процессах маркирования формируется в результате сложных взаимосвязанных явлений, происходящих в области деформирования и прилегающих к нему зонах: многократных упругих и пластических деформаций, изменения прочностных и пластических свойств деформируемого материала, трения и тепловых процессов, микро- и макроструктуры, микрогеометрии самой поверхности и др.

Традиционно при статическом методе маркирования для определения требуемых нагрузок используются характеристики сопротивления пластической деформации материала. При динамическом методе воздействия появляется еще одна характерная координата – скорость, которая делает описание процесса маркирования более сложным, так как требуется описание процесса маркирования не только на различных масштабных уровнях, но и их развитие во времени. В ряде работ показано [46, 51], что традиционно используемые для описания деформирования скоростные зависимости прочности и пластичности являются не только характеристикой материала, но и функцией реализованной схемы нагружения.

Факторами, оказывающими влияние на сопротивление деформации при маркировании, являются свойства материала, напряженное состояние, степень деформации, скорость деформации, температура.

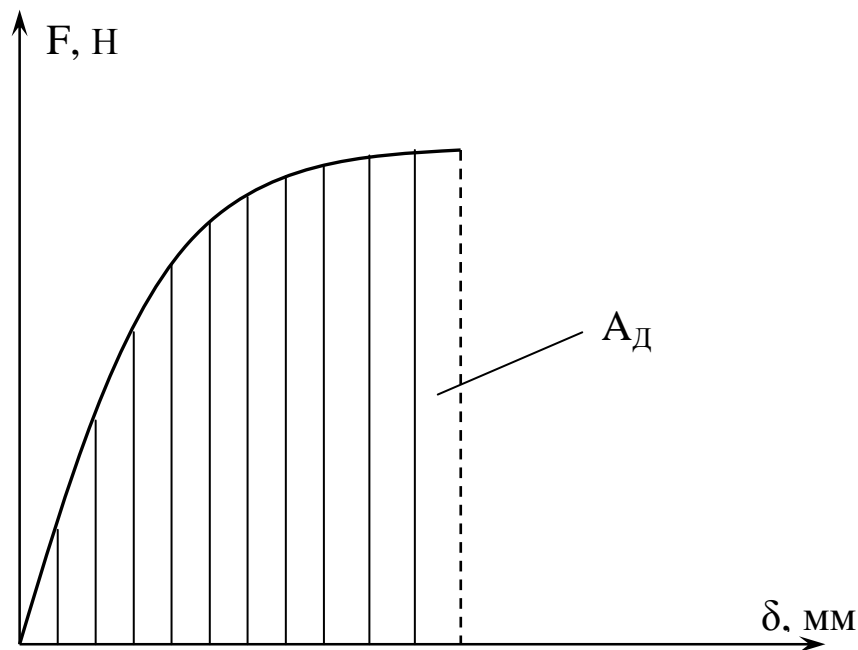


Рис. 1.3. Ход кривой деформации материала при маркировании

Основные параметры маркирования следующие: упругая и пластическая деформации в очаге деформирования; площадь контакта инструмента-клеймителя с обрабатываемой поверхностью; сила воздействия на инструмент; напряжения, возникающие под действием силы; кратность приложения силы.

Как при статическом, так и при ударном воздействии на обрабатываемой поверхности образуется оттиск (отпечаток) от инструмента-клеймителя. Процесс деформирования при маркировании изображен на рис. 1.3. По мере увеличения силы F происходит упругая деформация поверхности, а затем пластическая. Заштрихованная площадь на рис. 1.3 соответствует работе A_d , требуемой при деформации материала.

Приближенное значение усилия при маркировании и клеймении различных деталей и изделий можно определить по формуле [13, 21]:

$$F = S_{\Pi} \cdot q, \quad (1.1)$$

где S_{Π} – площадь проекции рабочего торца клеймителя, мм²;

q – удельное сопротивление металла силовому воздействию, МПа, определяемое по справочным данным, для некоторых металлов приведено в табл. 1.2. Полученное значение по формуле (1.1) следует увеличить на 15-20% для надежности.

Таблица 1.2

Удельные усилия q при клеймении

Материал изделия	q , МПа	Материал изделия	q , МПа
Латунь отожженная	500-900	Алюминий	600-1200
Латунь	2500-3000	Нейзильбер	800-1400
Медь отожженная	800-1000	Сталь 08, 10	1000-1500
Золото	1200-1500	Сталь 15	1600-1800
Серебро, никель	1500-1800	Сталь 20, 25, 35	2000-2800
Платина	1600-1800	Коррозионно-стойкие стали	2000-3000
Платина (сплавы)	2000-2600	Сталь 1Х18Н9Т	2200-2600
Палладий (сплавы)	2200-2800		

Вследствие широкой номенклатуры деталей и изделий в промышленности целесообразно классифицировать операции маркирования и клеймения по применяемым технологическим усилиям и работе пластической деформации A_d (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Диапазон применяемых усилий, кН	Диапазон энергий воздействий A_d , Дж	Основная область применения
1. Малые усилия 0,1 – 5	0,01 – 2	1. Маркирование мелких деталей (клеймение ювелирных изделий, пробирных игл, бирок, шильдиков и др.)
2. Средние усилия 5 – 20	1 – 10	2. Маркирование изделий в часовой, радиотехнической промышленности
3. Средние усилия 20 – 100	5 – 50	3. Маркировка арматуры, валов, гаек, шпилек и др.
4. Большие усилия 100 – 300	50 – 100	4. Маркирование изделий в машиностроении, приборостроении (клеймение трубопроводной запорной арматуры; металлических болванок, слитков, штанг, прутков, баллонов, колес и др.)

Технологическое усилие определяет условия работы штампа в целом и его конструктивное оформление, его значение и закон изменения по длине рабочего хода, то есть силовые и энергетические требования к оборудованию.

1.4. Приводы устройств маркирования и клеймения

В зависимости от вида используемой энергии приводы устройств маркирования можно классифицировать на виды (рис. 1.4). Рассмотрим применяемые приводы в устройствах маркирования и клеймения (УМК) при механических методах маркирования.

В рамках данной работы был проведен патентный поиск по теме «Приводы УМК при механических методах маркирования». Поиск проводился по описаниям изобретений и патентов СССР, РФ.

Цель проводимого патентного поиска — отыскание наилучшего сочетания привода с процессом маркирования в УМК по следующим критериям, обеспечивающим качество функционирования устройства в целом: простота и доступность; технологичность; возможность автоматизации процесса; материалоемкость; энергоемкость; надежность; экологичность; безопасность.

Представленную информацию можно разделить на две части:

- а) приводы и устройства для механического маркирования ударным методом;
- б) приводы и устройства для метода механического маркирования давлением.

Широкое распространение получили кривошипные, пневматические, электромагнитные приводы в устройствах маркирования и клеймения. Следует отметить, что при маркировании ударным методом получили распространение пневматические, электромагнитные приводы, а в методе маркирования давлением преобладают устройства с пневматическими и гидравлическими приводами. Для операций маркирования и клеймения используют устройства прямого действия (усилие от штока поршня или бойка передается непосредственно на пуансон) и рычажные устройства (усилие передается на пуансон через систему рычагов).

Существует множество различных способов ударного маркирования, начиная от ручных при помощи пуансона и молотка и кончая нанесением порядковых номеров специальными устройствами-нумераторами, обеспечивающими автоматическую смену знаков.

Пневматические приводы широко применяются для маркирования различных изделий. При небольших габаритах и использовании заводских сетей сжатого воздуха низкого давления (до 5-6 кгс/см²) они развивают значительные давления, достаточные для нанесения нескольких знаков. Приводы высокого давления применяются редко ввиду отсутствия магистральных сетей. В качестве привода применяются поршневые или диафрагменные цилиндры. Для увеличения усилия прессов иногда параллельно устанавливают по два поршня или две диафрагмы. Цилиндры могут быть одностороннего или двустороннего действия.

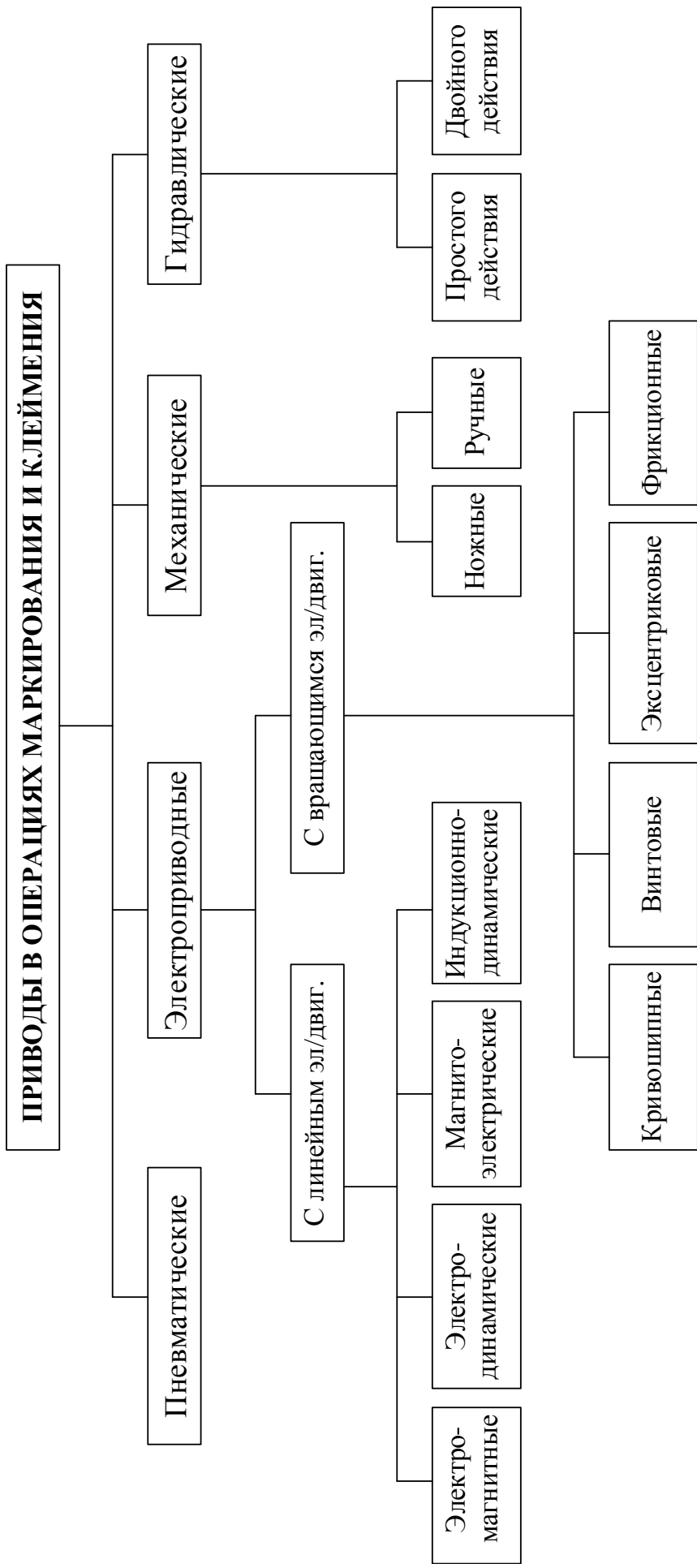


Рис. 1.4. Классификация приводов в операциях маркирования и клеймения

Известны пневматические приводы для маркирования (Пат. РФ 2077764, АС № 613837, АС № 747566), осуществляющее клеймение ударным методом силовым пневмоцилиндром [121-125]. Например, устройство для клеймения проката в торец рычажного типа [125], имеющее раму, на которой в подшипниковых горизонтальных опорах закреплен ударный рычаг; средства стопорения его в верхнем положении; подвеску с бойком; смонтированные в бойке барабаны с клеймами; механизмы поворота барабанов для смены клейм. Подвеска и рычаг снабжены пневмоцилиндрами подъема–опускания, причем подвеска связана со своим пневмоцилиндром через предусмотренный двуплечий рычаг и установленную на его свободном конце посредством оси и щек траверсу. Механизм смены клейм выполнен в виде шагового двигателя, связанного шпинделем с барабаном.

Уральским НИТИ [123] разработано устройство клеймения с пневмоприводом, предназначенное для маркирования и клеймения торцовых поверхностей заготовок квадратного сечения в горячем состоянии с 16–значной маркировкой, содержащее клеймовочную головку, связанную с основным силовым пневмоприводом (рабочее давление воздуха 0,5-0,6 МПа) и двумя вспомогательными: электроприводом с вращающимся двигателем для горизонтального перемещения механизма клеймения и приводом на основе гибридного шагового двигателя для набора маркировочного знака. Маркировка наносится на открытый торец муфты трубы методом последовательного выдавливания знаков. Применяется ударный способ нанесения знака пневматическим цилиндром. Устройство имеет массу 2200 кг.

Используя массивные ударники, бойки и молоточки, можно с помощью пневматических цилиндров добиться резкого удара и соответственно четкой маркировки. На рис. 1.5 изображено переносное пневматическое устройство рычажного типа для многозначного маркирования [18]. Оно позволяет производить маркирование одновременно восьми знаков, причем все знаки внедряются на одинаковую глубину независимо от прямолинейности маркируемой поверхности. Устройство состоит из корпуса 5, в рукоятке которого размещены золотник, пневмоцилиндр 1 с поршнем 2 и штоком 3. К верхнему торцу плунжера золотника прикреплен подпружиненный курок 4.

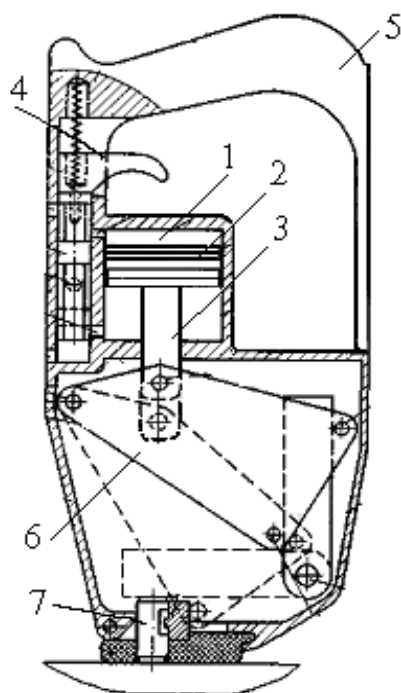


Рис. 1.5. Переносное пневматическое УМК рычажного типа

Усилие от штока пневмоцилиндра 2 передается через рычаг 5 на пуансон 6, который непосредственно воздействует на маркируемую деталь. Удар по пуансонам осуществляют отдельные молоточки, кинетическая энергия которых одинакова благодаря одной и той же массе и скорости молоточков. Пневмоцилиндр придает молоточкам начальное движение.

Для однозначного маркирования применяются устройства пистолетного типа облегченной конструкции, оснащенные пневмоударниками. Включение осуществляется от курка или от нажатия пуансоном на маркируемое изделие. В некоторых устройствах пистолетного типа в качестве энергоузла используются реконструированные строительно-монтажные пистолеты типа СМП, заряжаемые стандартными патронами [18].

Из зарубежных производителей следует выделить американскую компанию TELESIS, производящую маркировочные системы Pinstamp серий ТМР и ТММ с пневмоприводом и маркирующими ударными иглами.

При использовании пневматических цилиндров в качестве приводов для маркировальных устройств трудно создать необходимую силу удара, так как пневмоцилиндры, работающие от сетей сжатого воздуха давлением 4–6 кгс/см², обладают невысокими скоростями подвижных частей (до 1 м/с) [18, 28]. Пневмоцилиндры ударного типа позволяют получить более высокие скорости путем создания большей разности давлений по обе стороны поршня. Энергия удара в таких цилиндрах достигает 40–60 Дж при диаметре поршня 75 и ходе 150 мм, что эквивалентно энергии удара молотком массой 0,9 кг. Для увеличения силы удара в устройствах с обычными пневматическими цилиндрами используют различные стопорные механизмы в виде пружинных защелок, электромагнитов, создающие сопротивление поршню и быстрый его сброс при достижении необходимого давления.

Представляет интерес УМК импульсного действия с использованием энергии пороховых газов. Таким устройством можно маркировать одновременно несколько знаков. Применяют его для маркирования заготовок, металла, а также крупногабаритных изделий. Устройство подводят к маркируемой поверхности, нажимая курок, производят выстрел. Пороховые газы разгоняют шток, несущий кассету с пуансонами. Пистолет соединен с рабочим механизмом маркировального устройства быстросменным резьбовым угольником, обеспечивающим удобство в работе при маркировании [18].

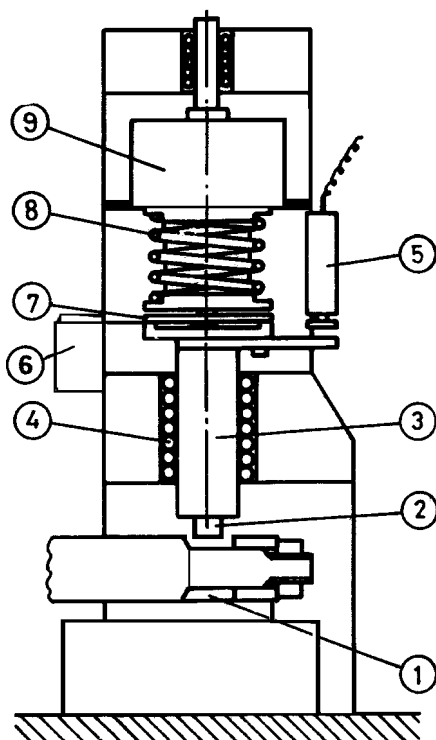


Рис. 1.6. УМК пружинного типа

Известны механические устройства для ударного клеймения, использующие энергию сжатой пружины (АС № 541530) [120]. Устройства пружинного типа (рис. 1.6), использующие энергию плоских и спиральных пружин, получили распространение в связи с простотой конструкции и отсутствием энергоносителя. На рисунке цифрами помечены: 1 – деталь, 2 – штамп, 3 – боек, 4 – шарикоподшипник, 5 – датчик перемещений, 6, 7 – блок фиксации, 8 – пружина, 9 – груз. Устройства позволяют получить четкий и довольно глубокий оттиск. Резкий удар достигается за счет мгновенного спуска пружины, воздействующей на пуансон. Взвод бойков создается различными механизмами или вручную. Механизм взвода может срабатывать от кулачка, электромагнита и т.п.

Электроприводные УМК используют наиболее совершенный вид энергии – электрическую и имеют сравнительно высокий КПД. Устройства маркирования и клеймения с электроприводом можно разделить по способу преобразования энергии на две группы.

1. С преобразованием вращательного движения электродвигателя в возвратно-поступательное при помощи кривошипно-шатунных, кулачковых, эксцентриковых, винтовых и других устройств.

2. С непосредственным преобразованием электрической энергии в кинетическую энергию прямолинейного движения пуансона.

Особенности конструкции кривошипного привода заключаются в том, что:

1) устройство работает очень быстро, так как каждому обороту вала соответствует один рабочий ход ползуна;

2) ход ползуна относительно невелик;

3) сила давления устройства недостаточна для обработки крупных деталей.

Эксцентриковые УМК с электрическим приводом часто применяют в тех случаях, когда за короткое время необходимо промаркировать большое количество мелких деталей [25].

Находят применение механизмы переносного и стационарного типов. Широкое распространение получили универсальные кривошипные и эксцентриковые прессы, оснащенные приспособлениями для установки маркируемых изделий.

Известно несколько конструкций УМК с линейным электромагнитным приводом [115, 116], предназначенных для клеймения ювелирных изделий, инструмента, маркирования изделий, табличек и шильдиков. На рис. 1.7 показано настольное УМК с электромагнитным приводом, применяемое для клеймения мелких изделий в системах пробирного надзора (Пат. РФ №2065360). В качестве электромагнитного привода использован линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД) с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным направляющим корпусом [86]. Устройство состоит из следующих конструктивных узлов: станины 1, линейного электромагнитного двигателя 2, устройства питания и управления 3, педали подвода рабочего инструмента 4 и устройства крепления наковальни (магнитный прихват) 5.

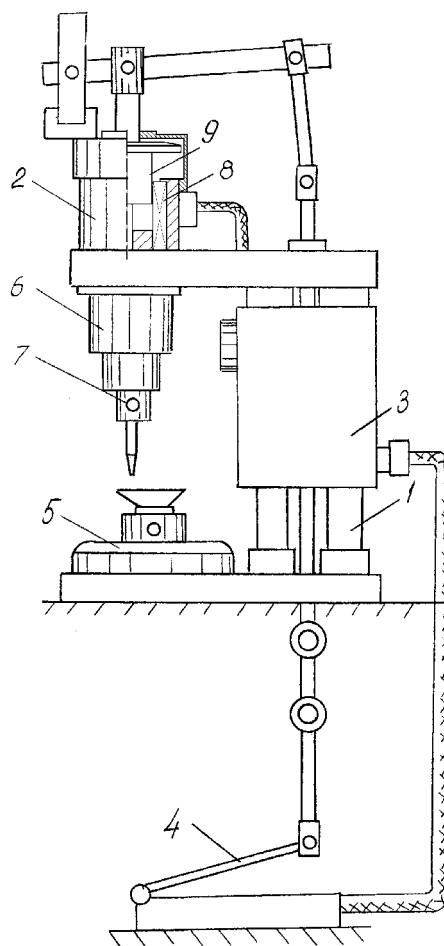


Рис. 1.7. УМК с электромагнитным приводом

Работа УМК с линейным электромагнитным приводом осуществляется следующим образом. При подаче электрического импульса напряжения на обмотку 8 ЛЭМД ферромагнитный якорь 9 под действием магнитного поля придет в движение и пуансон, связанный с якорем через устройство подвода рабочего инструмента 6, производит клеймение. Электромагнитное УМК предназначено для клеймения и маркировки изделий в широком диапазоне усилий, при этом в зависимости от требуемого усилия подается импульс питающего напряжения соответствующей амплитуды, регулируемый через блок питания и управления. Максимальное усилие устройства – 2000 Н. Данное устройство потребляет мощность 100 Вт, питается от сети 220 В и имеет массу 16 кг. Перспективным направлением развития и усовершенствования таких устройств является наличие возможности снижения металлоемкости и увеличения удельных энергетических показателей до предельных теоретических [39].

Преимущество приводов с непосредственным преобразованием электрической энергии в кинетическую энергию прямолинейного движения заключается в малой металлоемкости и потребляемой энергии, отсутствии трансформации механической энергии маркирования, простоте и экономичности, регулировании величины усилия в широких пределах, плавном подводе рабочего инструмента. Электромагнитные приводы могут работать в

различных рабочих и силовых режимах с возможностью регулирования количества ходов, величины хода, усилия, выходной энергии и мощности.

Кривошипные приводы (рис. 1.8) следует отнести к категории нерегулируемых машин: они имеют постоянную величину хода и жесткую кривую скорости ползуна, а также постоянное количество ходов в минуту, что сужает их технологическую оперативность [7].

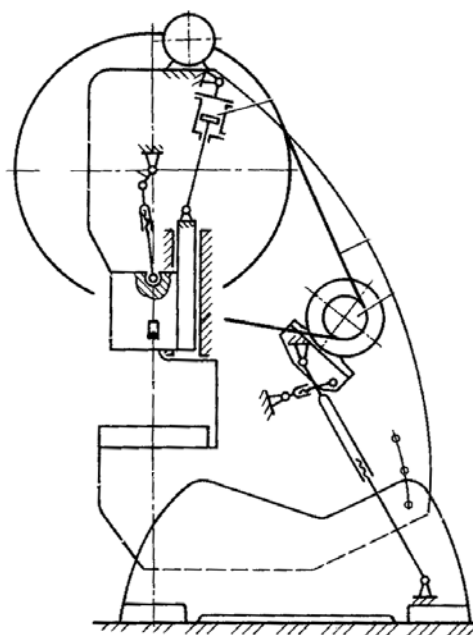


Рис. 1.8. УМК с кривошипным приводом

Маркирование давлением с использованием пневматических, гидравлических и фрикционных прессов и других устройств позволяет получать выпуклые знаки. При этом можно получать многозначные маркировки довольно больших размеров. Так как одновременно наносится вся маркировка при значительных усилиях, то мощность и габариты маркировочного оборудования велики. Возможность выдержки пуансона позволяет получать качественные оттиски значительной глубины. Получение рельефных знаков основано на явлениях течения металла, когда приложенное усилие превосходит его предел текучести, а также на способности металла заполнять впадины и углубления в пуансоне при значительных приложенных нагрузках.

Гидравлические приводы применяются при тиснении групповых маркировок, где требуется получить как большое давление, так и выдержку пуансонов. В нижней части станины такого устройства встроена насосная станция, состоящая из электродвигателя мощностью 3 кВт и эксцентрикового насоса. Давление жидкости передается на прессующий поршень (ползун) прессы, который вследствие этого перемещается вниз, производя

маркирование. Для данного привода характерно, что при относительно низком давлении жидкости достигается большое усилие прессования, причем это усилие допускает плавную регулировку, но при необходимости можно опустить ползун с большой скоростью. Высота подъема ползуна прессы большая, а одностоечная конструкция станины обеспечивает возможность свободного доступа к его столу с трех сторон.

Известны комбинированные приводы, используемые в устройствах маркирования, например, патент РФ №2090342 использует гидropневмопривод в генераторе механических импульсов, который является исполнительным органом при осуществлении маркирования, а также упрочнения изделий из металлов статико-импульсным методом воздействия [106]. Принцип действия основан на преобразовании напора жидкости от маслостанции в возвратно-поступательное движение бойка, ударяющего по инструменту, статически поджатому к обрабатываемой поверхности. Гидropневматические приводы сочетают в себе преимущества как пневматического (по легкости управления, точности слежения), так и гидравлического приводов, имеют повышенное в 1,5-3 раза по сравнению с пневмоприводом быстродействие и малые габаритные размеры исполнительных устройств. Недостатками этого привода являются высокая стоимость и конструктивная сложность, что ведет к низкой надежности.

Основными типами силовых приводов по данным [28] являются гидравлические (43,4%) и пневматические (43,3%), остальные 13,3% составляют электроприводы. Имеется тенденция к расширению применения электроприводов.

Меньшее распространение получили кривошипные, эксцентрикoвые, фрикционные электроприводы в УМК. Это обусловлено излишней громоздкостью оборудования, дополнительным преобразованием вращательного движения в возвратно-поступательное.

Каждый тип привода, использующий соответствующую энергию, имеет преимущества и недостатки, рациональную область применения. Так, например, пневматические приводы, отличаясь простотой конструкции и надежностью в работе, имеют большие удельные затраты энергии, низкий КПД. Гидравлические приводы сложны по конструкции и управлению и, как правило, тихоходны. Общими недостатками пневмо- и гидроприводов являются утечки и загрязнение энергоносителя, сложность передачи его на большие расстояния.

Применяемые на заводах методы и устройства для маркирования крайне разнообразны как по принципу действия, так и по конструктивному оформлению.

Однако на многих производствах маркирование осуществляется еще вручную с применением перьев, штемпелей, пуансонов с молотком и др. [18].

1.5. Сравнительный анализ линейных электрических приводов

В отличие от электродвигателей вращательного действия, способных совершать длительное вращательное движение при непрерывном обмене энергией между электрической и механической системами, в линейных электрических двигателях осуществляется механическое поступательное и возвратно-поступательное перемещение при дискретном энергопреобразовании.

Преимущество приводов с непосредственным преобразованием электрической энергии в кинетическую энергию прямолинейного движения заключается в отсутствии промежуточной трансформации механической энергии, простоте и экономичности регулирования величины усилия в широких пределах.

По КПД и коэффициенту мощности линейные электродвигатели уступают электрическим двигателям вращательного движения. Однако чаще всего сейчас линейные электродвигатели не конкурируют с вращательными двигателями как самостоятельными элементами, а конкурируют системы, содержащие их. При механизации и автоматизации некоторых процессов становится более важным принципиальная возможность выполнения конкретного технологического процесса с заранее данными его параметрами, что позволяет оценить не сами двигатели, а всю систему электропривода в условиях конкретной технологии. Так, например, в ЛЭМД показатель использования активных материалов, отнесенных к двигателю, составляет 35...50 кг/кВт, а в двигателях вращательного движения – 0,5...1,5 кг/кВт [4]. Для электромагнитных приводов характерно отсутствие весового и энергетического балласта, в то время как у кривошипных приводов при рабочем ходе не используется до 40 % номинальной энергии маховика [7].

Линейные электроприводы по принципу действия, определяющему конструктивные особенности и технические возможности, подразделяются на следующие типы: электромагнитные, синхронные, асинхронные, электродинамические, индукционно-динамические, магнитоэлектрические, магнито-стрикционные и электрострикционные.

Линейные асинхронные и синхронные двигатели применяются преимущественно для привода транспортных систем до скоростей 600 км/ч, коммутационной аппаратуры и раздвижных дверей, толкателей, стрелочных переводов [63]. Использование этих двигателей в приводах малых перемещений для устройств маркирования нецелесообразно.

Линейные магнито-стрикционные двигатели применяются в буровых и породоразрушающих машинах, основанных на использовании механических и акустических колебаний с помощью резонансных систем. Достоинством этих двигателей являются высокий моторесурс, превышающий 5000 часов при общем КПД преобразования энергии 65 %, большие удельные мощности, достигающие до 10 кВт/см² [7, 44]. Однако в приводе маркировочного оборудования эти двигатели не применимы из-за малых величин рабочего хода

(относительное удлинение достигает $\Delta l/l \sim 10^{-3}$), полезной удельной работы, больших линейных размеров и специфичности рабочего применения.

Линейные электрострикционные двигатели имеют простую конструкцию, малые габариты и КПД 70 % [7], обладают высокой технологичностью изготовления и надёжностью работы, определяемой отсутствием обмоток возбуждения, низкой металлоёмкостью, высокими удельными показателями. В настоящее время основная область применения этих двигателей – обеспечение прецизионных линейных перемещений, вибрационных устройств и акселерометров, генерации ультразвуковых колебаний. В приводе силового оборудования данный класс двигателей не применим из-за низких значений тяговых сил, перемещений, недостаточной динамической прочности якоря.

Линейные магнитоэлектрические двигатели практического применения в качестве ударных машин не получили широкого применения из-за того, что постоянные магниты, используемые в конструкциях таких двигателей, сильно ухудшают свои магнитные характеристики при ударных воздействиях [44]. Существующие на данный момент самарий-кобальтовые и неодим-железоборные сплавы постоянных магнитов обладают высокими значениями удельной энергии $(W)_{\max}$, достигающей 400 кДж/м^3 [12], и занимают уникальное положение по соотношению энергетическая характеристика/стоимость, что объясняет бурный рост их производства и внедрение в различные отрасли. Возможно, новейшие технологии в области производства новых сплавов для постоянных магнитов [12, 83] позволят создать удароустойчивые постоянные магниты, и тогда они будут конкурировать с ЛЭМД, так как КПД энергопреобразования у них выше по сравнению с ЛЭМД из-за отсутствия потерь на намагничивание. Недостатком этого типа двигателей является достаточно высокая стоимость постоянных магнитов.

На рис. 1.9 приведены диапазоны рабочих перемещений δ и скоростей V , реализуемые некоторыми линейными электроприводами. По принципу создания рабочего усилия наиболее распространенные и конкурентоспособные импульсные линейные электрические двигатели в приводах при операциях маркирования и клеймения подразделяются на:

- электромагнитные (ЛЭМД);
- электродинамические (ЛЭДД);
- индукционные (ЛИД);
- индукционно-динамические (ЛИДД).

Из рис. 1.9 следует, что ЛЭМД имеет ограничения по скорости (начиная со скоростей исполнительного якоря-органа от 15 м/с и выше), поэтому необходимо применять системы ЛИД, ЛИИД, ЛЭДД. Проведем анализ по удельным энергетическим показателям этих двигателей с целью выявления класса двигателей, в котором имеет место наибольшее тяговое усилие на единицу активных материалов двигателя и КПД.

Общим для функционирования систем ЛИД, ЛИДД, ЛЭДД и ЛЭМД является использование пондеромоторных сил взаимодействия полей.

Принцип действия ЛЭМД основан на взаимодействии магнитного поля катушки с ферромагнитным сердечником. Формула электромагнитной силы, возникающей между ярмом и якорем ЛЭМД, определяется выражением, полученным из уравнения энергетического баланса электрической цепи электромагнита:

$$F = \int_0^i \frac{\partial \Psi}{\partial x} di. \quad (1.2)$$

Очевидно, что сила, развиваемая ЛЭМД, при прочих равных условиях тем больше, чем сильнее изменяется потокосцепление при перемещении якоря во всем диапазоне значения тока – от нуля до значения, при котором определяется результирующая сила F , то есть сила действует в направлении увеличивающейся интенсивности поля.

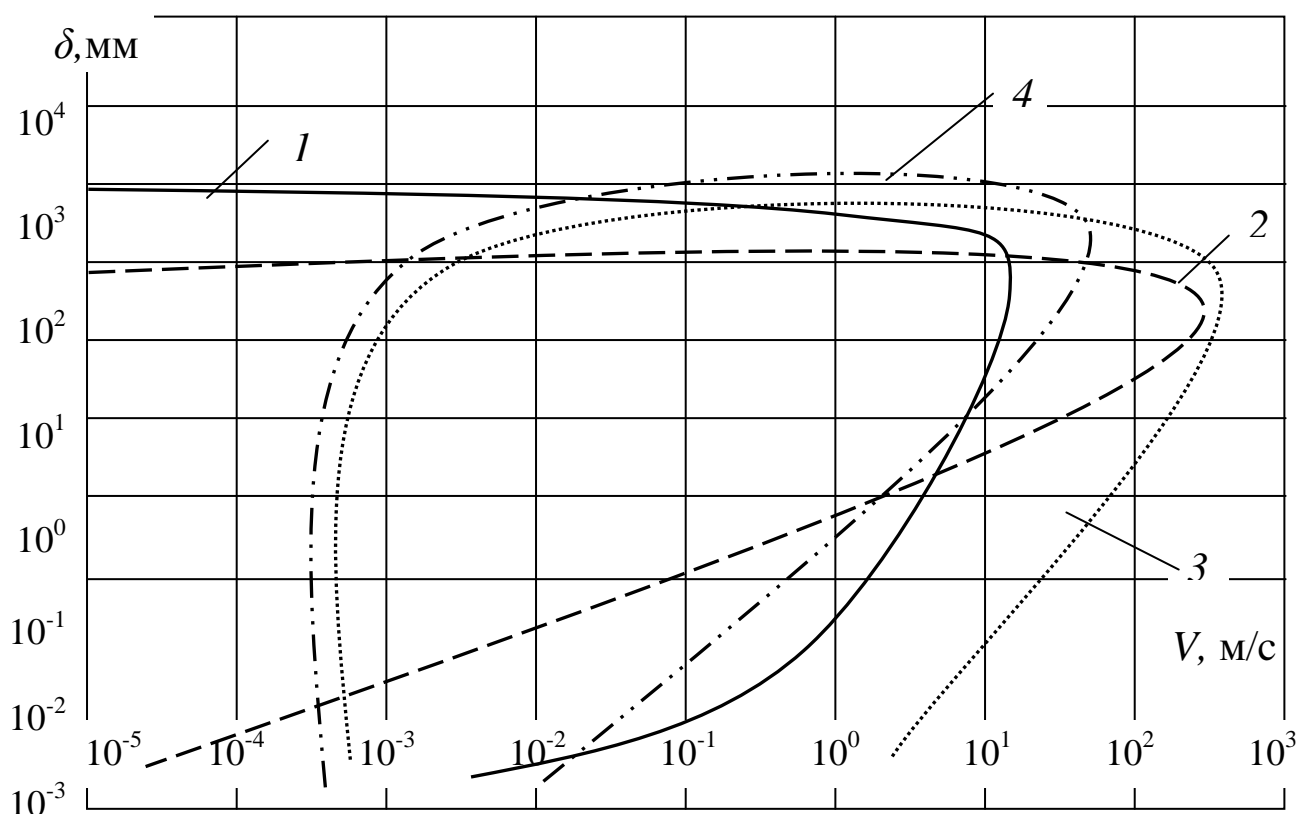


Рис. 1.9. Диапазоны рабочих перемещений δ и скоростей V , реализуемые линейными электроприводами:
1 – электромагнитные; **2** – электродинамические; **3** – индукционные;
4 – индукционно-динамические

В принципах действия ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД следует учитывать, что пондеромоторные силы, действующие на контур, не зависят от закона изменения токов и магнитных потокоцеплений в функции времени и координат, а зависят от изменения собственных и взаимных индуктивностей контуров и линейных значений токов, протекающих в них. В общем случае создаваемое этими двигателями усилие, действующее в системе n – контуров с токами I_n на контур q в направлении перемещения x , рассчитывается на основе теории цепей по формуле [47]:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_k I_l \frac{dM_{kl}}{dx}, \quad (1.3)$$

где M_{kl} – взаимная индуктивность контуров k и l (при $l = k$, M_{kk} – собственная индуктивность контура k – L_k).

Эффективность технического использования силового воздействия импульсного магнитного поля в ЛИД, ЛЭДД, как и в ЛЭМД, связана с отсутствием промежуточной среды с высокой температурой и давлением, т. е. при совершении механической работы происходит непосредственное использование электромагнитной энергии. Это позволяет добиться лучшей управляемости, стабильности и многократной воспроизводимости силового воздействия, повышает безопасность работы и культуру производства, в котором используются порох и взрывчатые вещества для высокоскоростного привода штампов и обработки металлов. Силовое воздействие магнитного поля также исключает вредное воздействие промежуточной среды. Как правило, наличие дорогого и громоздкого емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в системах ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД является обязательным, а напряжение заряда накопителя находится в пределах от 1 до 10 кВ [67, 82, 84, 85], что повышает риск получить электротравму у лиц, обслуживающих данные системы. Необходимость заряда накопительных конденсаторов в системах ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД до напряжений, значительно превышающих номинальные напряжения сети, предопределяет использование трансформаторов, что также влияет на уменьшение надежности и увеличение массогабаритных показателей привода. В ЛЭМД уровни применяемых электрических напряжений на 2-3 порядка ниже, а КПД выше.

Разряд высоковольтных батарей конденсаторов большой емкости на индукторные системы ЛИД и ЛЭДД позволяет получить плотности магнитной энергии и сил выше, чем в обычных взрывчатых веществах [73, 84]. Диапазон применяемых импульсных токов для ЛИД, ЛИДД, ЛЭДД – от 10^2 до 10^6 А, а для ЛЭМД – до 10^3 А. Отсюда наличие в ЛИД, ЛИДД, ЛЭДД сильных электромагнитных полей импульсного характера. Последние исследования показали влияние таких полей как потенциально опасных для здоровья [88, 89]. В ЛИД, ЛЭДД импульсные магнитные поля достигают 15 Тл и выше; в ЛЭМД электромагнитные поля значительно ниже, так как величина магнитного поля

ограничена индукцией насыщения магнитной системы (2 Тл), к тому же они замкнуты магнитной системой (наличие внешнего ферромагнитного экрана – статора). В отличие от ЛЭМД масса и габариты емкостного накопителя энергии, применяемые в приводах ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД, как правило, значительно больше самого линейного преобразователя, в целом это влияет на удельные показатели всего привода. Предельные показатели линейных электроприводов различных классов при питании от ЕНЭ приведены в табл. 4.

В работе [41] приведен анализ систем ЛЭМД, ЛИДД и ЛЭДД; было выявлено, что по степени создания наибольшего тягового усилия на единицу активных материалов выигрывает класс ЛЭМД, соотношение показателя использования активных материалов на единицу тягового усилия для данных двигателей составляет 1:(4,5-5):(7,65-8,5) для ЛЭМД, ЛИДД и ЛЭДД соответственно.

Анализ данных табл. 1.4 показывает, что силовые электромагнитные импульсные системы (СЭМИС) на основе ЛЭМД по сравнению с другими системами выигрывают в отношении удельных энергетических показателей и КПД.

К недостаткам ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД также следует отнести:

- низкий КПД и резко падающий характер силовой характеристики с увеличением рабочего хода от двигателя до ускоряемого тела якоря;
- высокие значения применяемых электрических напряжений;
- высокие требования к быстродействию;
- наличие электромагнитных полей импульсного характера;
- жесткие требования к электрической изоляции;
- повышенную электроопасность;
- высокую стоимость.

Важным положительным свойством ЛЭМД для привода в операциях маркирования и клеймения является возрастающий характер силового воздействия на большей части хода якоря.

**Предельные показатели линейных электроприводов различных классов
при питании от емкостного накопителя энергии**

Класс привода	Применяемые напряжения, кВ	$k_m = \frac{m_{ЕНЭ} \text{ } ^1)}{m_{ЛЭД}}$	КПД ²⁾ η , %	Удельный энергетический показатель привода, Дж/кг	Тяговое усилие на единицу сечения бойка, Н/см ²	Удельное тяговое усилие двигателя, Н/кг	Литература
1. ЛЭМД	до 0,4	0,05 – 1	40-55 (60-75)	10-20	160-250	4500-5000	[4], [7], [54], [41]
2. ЛИД	1 – 20	5 – 7	до 20 (30)	5-10	1500	3500	[66], [67], [85]
3. ЛИДД	1 – 5	2 – 3	до 25	до 10	1200	1000	[93], [85], [41]
3. ЛЭДД	1 – 10	5 – 8	до 15 (35)	до 5	500	500-650	[42], [84], [41]

Примечание:

¹⁾ k_m – параметр, характеризующий отношение массы накопителя энергии к массе данного линейного электрического двигателя.

²⁾ Представленные в таблице значения в скобках для КПД ЛЭМД, ЛИД и ЛЭДД приведены с учетом применения дополнительного охлаждения обмоток хладагентом (жидким азотом).

Таким образом, ряд недостатков, свойственных ЛИД, ЛИДД и ЛЭДД, ограничивает область их практического применения в приводе устройств маркирования и клеймения. Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что применение линейного электромагнитного привода, отличающегося простотой конструкции, высокими удельными энергетическими показателями, сравнительно высоким КПД, удовлетворяет требованиям маркирования и клеймения.

1.6. Технологические основы применения силовой электромагнитной импульсной системы (СЭМИС) в операциях маркирования и клеймения

При маркировании и клеймении необходимо учитывать способность каждого сплава к пластической деформации. Существует максимально допустимые степени деформации для сплавов. Потребное усилие при маркировании зависит от ряда факторов, таких как твердость металла, количество и величина знаков маркировки, заострение профиля знаков, периметр и конфигурация знаков, глубина маркирования и др. Поэтому используемый привод должен обеспечивать регулирование усилия в известных пределах.

Силовое воздействие инструмента приводит в некоторых случаях к концентрации напряжений. Особенно это нежелательно, если после маркирования изделие подвергается последующей термической обработке. Тонкостенные высокоточные и хрупкие изделия маркировать механическими методами не рекомендуется. Поэтому часто применяют другие методы или используют навесные маркировки в виде бирок, табличек, этикеток.

В устройствах маркирования и клеймения (УМК) с линейным электромагнитным приводом используются импульсные режимы, в которых частота повторения импульсов обычно не превышает 3 Гц и длительность импульса мала по сравнению с периодом их повторения. Именно в таком режиме большей частью работают импульсные УМК. При этом периодичность импульсов не должна оказывать существенного влияния на конструктивные элементы СЭМИС, которая определяется прежде всего параметрами питающего импульса: длительностью $t_{и}$, напряжением U , мощностью P .

Кратковременность режима работы УМК, когда мощность потребляется в течение небольшого интервала времени, обуславливает импульсный режим работы привода.

Требования к приводу УМК

К приводу УМК предъявляется широкий комплекс разнообразных требований, которые можно разделить на функциональные, эксплуатационные и технико-экономические.

Функциональные требования определяют значения основных выходных параметров (давление рабочего органа на материал изделия и регулирование энергии воздействия, необходимые для пластической деформации маркирования, рабочий ход инструмента), получаемых посредством привода. Функциональные требования являются безусловными.

Эксплуатационные требования – это, прежде всего, высокая надежность используемого привода. Надежность привода определяется его электрической прочностью, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, температурным режимом, способностью выдерживать перегрузки в возможных аварийных режимах. Эксплуатационные требования также абсолютно безусловны.

Технико-экономические требования – это минимальные габариты, масса, потери энергии (энергоэффективность), стоимость, трудоемкость изготовления, а также технологичность, возможность использования в конструкции привода доступных материалов и т. д. Степень выполнения технико-экономических требований определяется свойствами применяемых в приводе магнитных, проводниковых, изоляционных и конструкционных материалов, уровнем технологии. В отличие от функциональных и эксплуатационных эти требования условны и в зависимости от конкретных обстоятельств могут изменяться в широких пределах. Наиболее важные функциональные требования касаются рабочего режима, когда при малом рабочем ходе требуется обеспечить необходимое усилие.

Из методов механического маркирования наименьшей энергоемкостью, материалоемкостью и высокой технологичностью процесса обладают ударный и квазистатический методы маркирования.

Операции клеймения и маркирования осуществляются при приложении значительных усилий и сравнительно небольших перемещениях рабочего инструмента. Это условие в основном обуславливает выбор соответствующего привода для рациональной и эффективной работы устройства в целом.

Сравнительный анализ устройств для механического маркирования и клеймения позволяет сделать вывод, что в качестве привода для ударного и квазистатического методов маркирования целесообразно использовать электропривод с непосредственным преобразованием электрической энергии в кинетическую энергию прямолинейного движения пуансона на базе СЭМИС.

СЭМИС относятся к электромеханическим преобразователям, обладающим рядом специфических свойств: ограниченностью механического перемещения, дискретностью энергопреобразования. Поэтому по сравнению с другими электромеханическими системами СЭМИС наиболее подходит по

всем параметрам технологическим операциям маркирования и клеймения. Применение СЭМИС в операциях маркирования и клеймения можно считать идеальным, так как параметры движения привода и параметры, требуемые для технологического процесса, совпадают. Кроме того, СЭМИС обладают, следующими неоспоримыми преимуществами:

- использование наиболее совершенного, распространенного и экологически чистого вида энергии;
- сравнительно высокие показатели и КПД преобразования энергии;
- большие возможности автоматизации технологических процессов;
- отсутствие промежуточного преобразования вида энергии.

Основные характеристики режима маркирования: амплитуда напряжения импульсов U , длительность импульсов t_u , период повторения импульсов T и производные величины – частота повторения $F = 1/T$, скважность $q = T/t_u$. В СЭМИС с массивным якорем скважность не должна быть меньше значений 100...1000, определяющихся как тепловым режимом работы, так и магнитными характеристиками, успевающих восстановить свои свойства в интервале между импульсами, поэтому механические усилия в последовательности будут приблизительно одинаковыми для данного значения питающего напряжения.

При технологических операциях маркирования и клеймения прецизионных деталей и изделий необходимо обеспечить стабильность энергии воздействия (деформации), несоблюдение этого требования может привести к браку ответственных и дорогостоящих деталей и изделий.

Абсолютная величина потерь пропорциональна частоте повторения импульсов, и при увеличении частоты увеличивается тепловыделение и температура активных частей СЭМИС. В связи с этим применение СЭМИС возможно только при частотах повторения, не превышающих 10 Гц, что удовлетворяет функциональному требованию УМК.

В данной работе СЭМИС выбрана в качестве привода для операций маркирования и клеймения механическим методом, т.к. обладает известными преимуществами перед другими приводами в данной технологической операции. Рассматриваются два направления решения задачи маркирования и клеймения деталей и изделий на основе применения СЭМИС в ударном и квазистатическом методах.

Метод квазистатического маркирования как безударное клеймение и маркирование с получением оттиска на поверхности деталей и изделий осуществляется при приложении значительных усилий и сравнительно небольших перемещениях рабочего инструмента. При использовании СЭМИС требование рабочего процесса должно реализоваться при малых рабочих воздушных зазорах (порядка 0,5-2 мм) и значительных усилиях при максимальных потокосцеплении и индуктивности. Выполнение операции происходит мягко, без удара, в квазистатическом режиме, хотя в электрической

цепи СЭМИС протекают динамические процессы, связанные с высокой скоростью нарастания тока.

Ударный метод маркирования требует к тяговой характеристике ЛЭМД высоких значений энергий воздействия к концу рабочего хода зазора для формирования необходимой энергии деформации. Рабочий процесс осуществляется при достаточно больших воздушных зазорах, при этом ограничение на постоянство воздушного зазора не накладывается, так как зазор в зависимости от операции может изменяться в широких пределах, например, для энергии удара $A_y=10$ Дж зазор составляет $\delta=10-20$ мм.

Область применения, выбор того или другого варианта исполнения УМК будет зависеть от требуемых технико-экономических показателей работы приводов в УМК с учетом предъявленных функциональных и эксплуатационных требований.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЭМИС В УМК

2.1. Структура СЭМИС в УМК

Все УМК с СЭМИС независимо от принятой конструкции исполнения можно рассматривать как комплекс, состоящий из технологического и энергетического оборудования. В состав СЭМИС входят преобразователи энергии – электрической, электромеханической и механической, образующие энергетический (или силовой) канал, и устройства управления преобразуемой энергии, составляющие информационный канал. В обобщенном виде структурная схема энергетических связей в СЭМИС представлена на рис.2.1.

Охарактеризуем роль и место каждого структурного элемента СЭМИС.

Двунаправленные стрелки на рис. 2.1 отражают тот факт, что энергия между двумя структурными элементами может передаваться в общем случае в любом направлении.

Участок распределительной сети (РС) является первым элементом энергетического канала, служащим для подвода электроэнергии. Параметры РС влияют на характеристики подводимого напряжения (симметрию, изменение напряжения при изменении потребляемого тока), что воздействует на режим работы последующих элементов силового канала. В свою очередь элементы силового канала влияют на потери энергии РС. Также при питании УМК от сети к последней предъявляются достаточно жесткие требования: сеть должна выдерживать значительные импульсы тока, допускать большую величину высокочастотных составляющих. При работе УМК достаточно большой мощности или при питании от недостаточно мощной сети встает вопрос о качестве электроэнергии [79] по условию колебания напряжения.

Для снижения такого взаимовлияния при питании СЭМИС от источников ограниченной мощности ввиду необходимости согласования внутренних сопротивлений источника питания и электромеханического преобразователя (ЭМП) вводится накопитель энергии (элемент НЭ).

Из известных в настоящее время НЭ наибольшее применение для питания СЭМИС в УМК нашли емкостные накопители энергии (ЕНЭ) – импульсные конденсаторы. Следует отметить, что функционально ячейка НЭ включает в себя помимо ЕНЭ и магнитный НЭ. Магнитный НЭ бывает двух видов: интегрированным с СЭМИС и автономным в виде устройств удержания якоря; в обоих случаях [4, 40, 91] магнитный НЭ предварительно аккумулирует магнитную энергию в индуктивностях СЭМИС при неподвижном якоре.

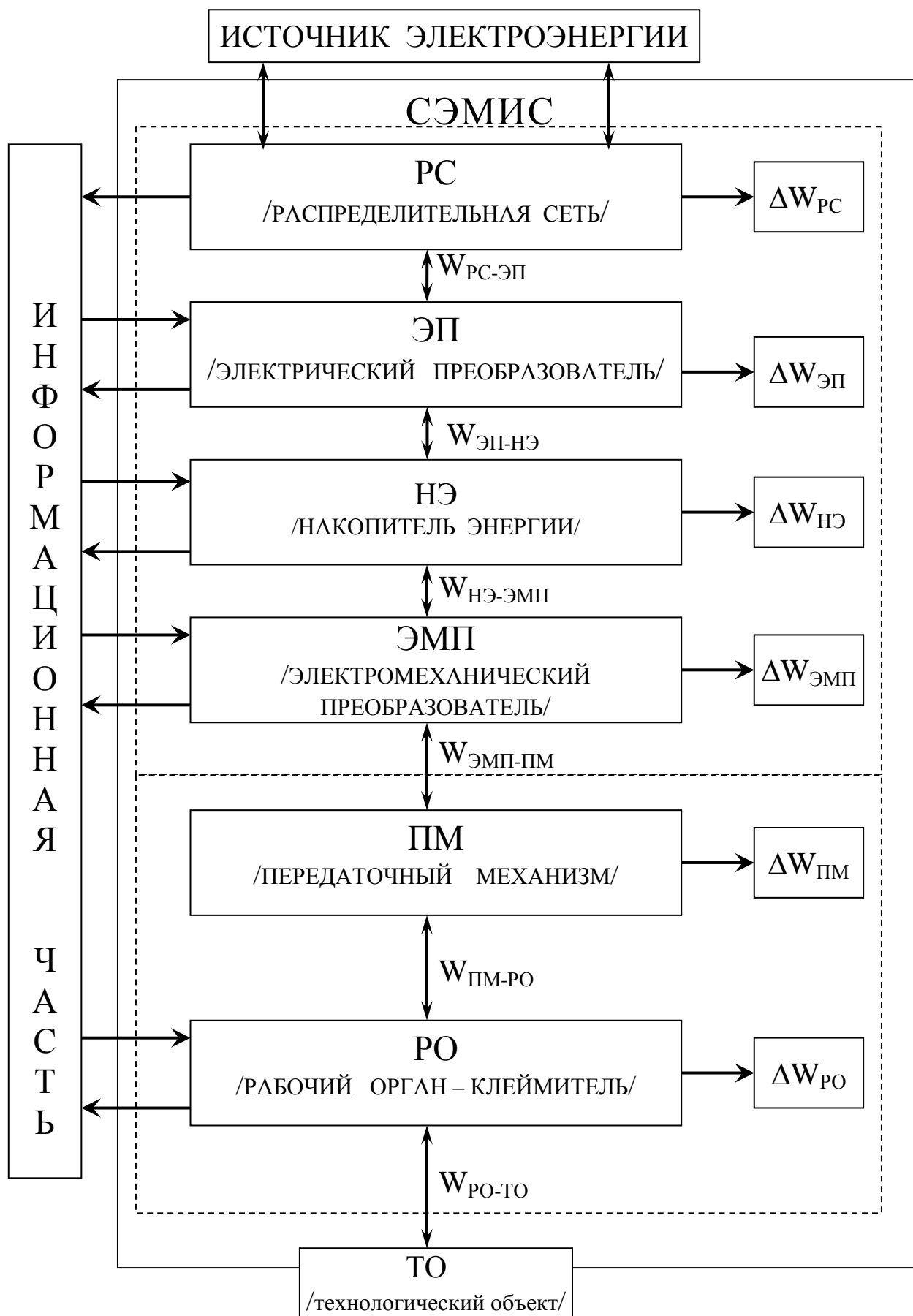


Рис. 2.1. Структурная схема энергетических связей СЭМИС в УМК

Для технологических операций маркирования и клеймения требуется регулирование силы удара. Возможность точного дозирования энергии, запасаемой в ЕНЭ, позволяет регулировать энергию удара с большой точностью повторения. Для установки нужной величины энергии удара подбираются элементы электрической схемы или осуществляется регулировка напряжения заряда конденсатора через электрический преобразователь (ЭП).

Таким образом, применение ЕНЭ продиктовано объективными причинами и позволяет:

- 1) исключить или уменьшить влияние на питающую сеть больших импульсов тока;
- 2) осуществить дозирование энергии удара;
- 3) обеспечить режим форсированного аккумулирования.

В процессе заряда ЕНЭ представляет собой нагрузку, изменяющуюся во времени от короткого замыкания до холостого хода, это приводит к необходимости ограничения тока заряда. При подаче сигнала управления от информационной части ЕНЭ выдает в дискретной форме накопленную электроэнергию для последующего преобразования ее в механическую работу ЭМП.

Электрический преобразователь (ЭП) служит для преобразования переменных, характеризующих поступившую на его вход электрическую энергию к необходимой дискретной форме последующего преобразования ее в механическую работу ЭМП. ЭП согласует частоты, фазы напряжений и токов первичного источника электрической энергии и входа ЭМП, а также изменяет их в соответствии с управляющими сигналами, управляя уровнями и направлениями потоков энергии к электромеханическому преобразователю ЭМП.

Значительное влияние на процессы электромеханического преобразования энергии оказывают нелинейности параметров. Из-за нелинейности параметров – коэффициентов в уравнениях электромеханического преобразования энергии, в воздушном зазоре появляются спектры гармоник поля, которые влияют на статические и динамические характеристики ЭМП. Параметрами ЭМП являются активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности и момент инерции.

Нелинейность каждого из параметров вносит свой вклад в спектр гармоник поля и оказывает влияние на процессы электромеханического преобразования энергии [5]. Используемый в СЭМИС электромеханический преобразователь электромагнитного типа осуществляет основную энергетическую функцию системы – преобразует электроэнергию в механическую энергию, задает характеристики механического движения рабочего органа-клеймителя (РО) и переменные, определяющие это движение: силу, скорость, необходимые для выполнения операций маркирования.

Передающий механизм (ПМ) представляет собой механическое устройство, предназначенное для передачи энергии к рабочему органу машины, согласования характеристик движения якоря ЭМП и РО.

В СЭМИС характерна интеграция узлов энергетического канала, например, якорь ЭМП может быть одновременно рабочим органом УМК. В некоторых типах СЭМИС ввиду отсутствия рабочей машины на технологический объект (ТО), например, обрабатываемую среду, воздействует исполнительный РО. В УМК рабочим органом является штамп, клеймитель, передающий механическую энергию от бойка к обрабатываемой среде.

Между элементами СЭМИС существуют пространственные, функциональные и информационные связи. Источник электрической энергии, технологический объект ТО, информационная система о состоянии ТО в состав СЭМИС не входят, являясь сопредельными областями, однако оказывают существенное влияние на выбор отдельных элементов системы, режим работы.

Все элементы СЭМИС функционируют как единое целое и порождают новые свойства, появляется новое качество – целостность. Наличие такого качества, как целостность, приводит к тому, что изменение в некоторой части СЭМИС вызывает изменение в других частях и в самом УМК в целом.

Горизонтальная структура СЭМИС определяется последовательностью технологического преобразования потоков энергии. СЭМИС можно переводить из одного состояния в другое, т.е. из режима двигательного в режим генерации и наоборот. Это возможно только при наличии в СЭМИС способов связей, обеспечивающих нормальное функционирование установки, т. е. в СЭМИС реализуется такое качество системы, как управление.

СЭМИС существует в некоторой окружающей среде, и ее поведение обуславливается этой средой. Описывая электромагнитную установку, выявляя и определяя ее свойства, мы переходим от реального импульсного ЛЭМП к его теоретической модели.

В заключение можно сказать, что описанная теоретическая модель СЭМИС – система, потому что является отображением множества связанных между собой элементов, так как сложна, представляет единое целое, имеет функциональные и информационные связи, структуру управления, взаимосвязь со средой и целесообразное поведение, разделенность с окружающей средой.

Поэтому при создании СЭМИС для операций маркирования и клеймения целесообразен комплексный подход – совместная разработка ЛЭМД-ЕНЭ и схемы питания-управления.

Структурная схема наиболее распространенного импульсного источника тока в СЭМИС с ЕНЭ приведена на рис. 2.2.

В такой схеме ЕНЭ емкостью C_H заряжается до необходимого напряжения от специального зарядного устройства ЗУ. ЗУ в общем случае состоит из трансформатора (может отсутствовать), выпрямителя и регулятора

зарядного тока. Зарядное устройство ZU подключается и отключается с помощью коммутирующего устройства, находящегося в преобразователе Π . Процессы включения и отключения ZU от сети, заряда ЕНЭ, а также подача отпирающего импульса на управляемый клапан VS контролируются системой управления $СУ$. Разрядный контур состоит из ЕНЭ емкостью C_H , нелинейных с переменными во времени параметрами активно-индуктивных сопротивлений СЭМИС. Разряд ЕНЭ на обмотку ЛЭМД происходит после отпирающего импульса от $СУ$ на управляемый клапан VS . В практической работе может встретиться случай, когда разряд конденсатора носит колебательный характер. Обмотка ЛЭМД шунтируется диодом VD , чтобы устранить колебательный характер разряда.

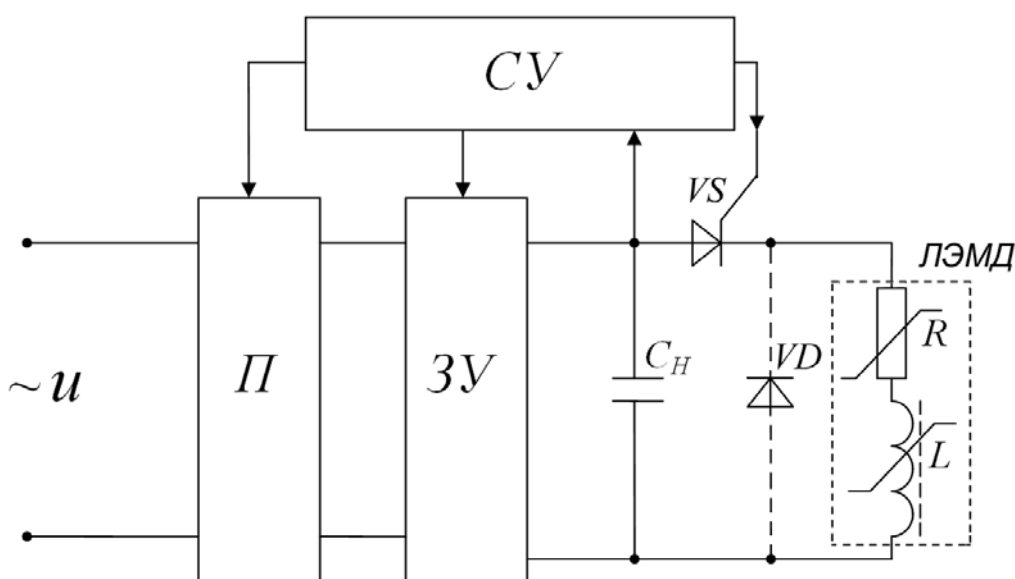


Рис. 2.2. Структурная схема импульсного источника питания СЭМИС

Наиболее простыми импульсными источниками тока для питания ЛЭМД в УМК являются источники бестрансформаторного типа [77], в которых энергия сети или источника электрической энергии другого типа поступает в виде импульса непосредственно на обмотку ЛЭМД. Исследованию рабочих процессов в таких схемах посвящено большое количество работ [7, 70, 77, 87].

В некоторых случаях предъявляются требования к форме импульса тока в нагрузке, например, получение прямоугольного или синусоидального импульса, сильнозатухающего после первого максимума. Для удовлетворения этих требований необходимо применять специальные схемы, например, цепные схемы, схемы с программированной работой емкостных и индуктивных накопительных элементов или схемы с использованием дополнительных нелинейных элементов.

При анализе схем питания и управления УМК необходимо исследовать процессы в трех контурах. Первый контур содержит первичный источник

питания и входную цепь преобразователя, осуществляющего изменение напряжения и ограничение тока, второй – выходную цепь преобразователя и емкостный накопитель, а третий – разрядный контур, емкостный накопитель и устройство с формирующими и коммутирующими элементами. Если третий контур можно анализировать совершенно самостоятельно, то первые два составляют совместно с преобразователем неразрывную систему и процессы в них должны рассматриваться в совокупности.

Критерии эффективности СЭМИС

Эффективность СЭМИС – это приспособленность СЭМИС к выполнению поставленных задач. Сравнительно длинный срок совершенствования ЛЭМД позволяет поставить вопрос о том, насколько приблизились их параметры к предельным для данного принципа действия и, следовательно, каковы перспективы дальнейшего развития ЛЭМД.

Рассмотрим с позиций этого положения вопрос о перспективе развития СЭМИС. Для этого проанализируем такой качественный показатель развития как эффективность, характеризующий собой степень использования материальных и энергетических ресурсов природы.

Обзор и анализ развития электромагнитного привода линейных машин [4, 39-41, 69, 80, 91, 98] позволяет сделать вывод, что для него не достигнута стабилизация показателей эффективности, служащая признаком возникновения тенденции перехода к новым машинам.

За время своего развития и совершенствования ЛЭМД заняли прочное место в приводе различных машин, механизмов и их рабочих органов, зарекомендовав себя как эффективные и высокопроизводительные устройства. Накопленный опыт разработок и эксплуатации ЛЭМД, а также постоянное совершенствование их конструкций, устройств питания и управления и методов оптимизации параметров дают основание утверждать, что использованы еще не все резервы их возможностей. Это позволяет отнести ЛЭМД к прогрессивным и перспективным видам электрооборудования [7, 39-41]. Большие потенциальные возможности импульсных ЛЭМД будут раскрываться по мере развития электромашиностроения, полупроводниковой техники, материаловедения и других смежных отраслей электротехники. Благодаря этому будут полнее удовлетворяться требования, предъявляемые в ЛЭМД со стороны рабочих машин и технологического процесса.

Количественную характеристику приспособленности СЭМИС к выполнению поставленных задач называют критерием эффективности, т.е. критерий эффективности – количественная характеристика эффективности СЭМИС. Критерий эффективности еще называют критерием оптимальности, функцией полезности, функцией цели.

В качестве критериев эффективности используют характеристики свойств и способностей СЭМИС. Критерии эффективности определяются

параметрами управления. Различные значения критерия эффективности СЭМИС показывают предпочтение одного варианта перед другим. Эффективность сложной СЭМИС не может быть оценена одним показателем. При оценке эффективности СЭМИС необходимо использовать различные показатели эффективности, характеризующие СЭМИС с разных сторон. Сформулируем основы выбора критериев эффективности СЭМИС.

При проектировании и исследовании СЭМИС необходимо проводить сравнение различных состояний установок по критерию эффективности. Это сравнение возможно только при количественном выражении критерия эффективности. При анализе и оптимизации СЭМИС необходимо выявить факторы, влияющие на критерий эффективности. Это влияние можно выразить числовыми характеристиками при аналитическом представлении критерия эффективности.

Состояние и свойства самой СЭМИС должны характеризоваться численными значениями ее внутренних параметров – характеристик и управлений, а также состоянием окружающей среды. Следовательно, критерий эффективности СЭМИС должен быть критичен как к внутренним, так и к внешним параметрам СЭМИС.

Поскольку критерий эффективности СЭМИС должен отражать степень приспособленности установки для решения поставленных перед ней задач, то он должен отражать структуру и основные свойства СЭМИС как системы, учитывать внешние и внутренние помехи и выявлять приспособленность СЭМИС к внешним условиям. Кроме того, каждый критерий эффективности должен отражать существенные стороны СЭМИС, т.е. иметь содержательность.

Ценность того или иного критерия эффективности СЭМИС состоит также в возможности его конструктивного использования в электроэнергетике. В зависимости от поставленных задач требования к критерию эффективности могут меняться, отсюда фактически будет меняться и его системное содержание.

В качестве критериев эффективности могут быть использованы следующие характеристики СЭМИС:

- потребляемая электрическая мощность,
- коэффициент полезного действия,
- удельные (на единицу массы и объема) энергетические показатели,
- удельные капитальные затраты на единицу установленной электрической мощности,
- удельные приведенные затраты.

Анализ энергоемкости различных импульсных технологических процессов показывает, что достигнутый и требуемый уровень удельной энергии удара в электромагнитных машинах ударного действия составляет для ручных машин 1...3 Дж/кг и 10...20 Дж/кг соответственно, мощных молотов (с

энергией удара до 30 кДж) - 2...6 Дж/кг и 7...12 Дж/кг, переносных электромолов (с энергией удара до 1 кДж) - 3...5 Дж/кг и 6..15 Дж/кг. Поэтому для реализации высокоэнергетических импульсных технологий с помощью силовых электромагнитных импульсных систем необходимо повышение КПД, удельных силовых и энергетических показателей линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД): движущей силы и энергии удара, отнесенной к массе машины. О важности решения этих задач свидетельствует то, что повышение энергетических показателей импульсных ЛЭМД имело решающее значение для развития СЭМИС.

Разработка вопросов теории и энергопреобразования, развитие методов расчета и оптимизации параметров позволили повысить КПД ручных электромагнитных машин ударного действия до 40...45 %, насосов до 75 % (вместо 6...12% у ранее созданных машин), снизить массу ручных электромагнитных ударных машин вдвое, что является одним из важнейших критериев для них, повысить долговечность в 8...10 раз. Именно повышение энергетических показателей импульсных ЛЭМД открыло возможности создания на их основе высокоэффективных машин.

Эргономические критерии эффективности для СЭМИС должны отражать степень совершенства отношений между импульсной системой и человеком в процессе ее эксплуатации. Наиболее важными критериями считаются критерии, касающиеся гигиены и безопасности труда.

В качестве критериев эффективности надежности СЭМИС используют:

- вероятность безотказной работы (вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ в работе СЭМИС не наступает);
- интенсивность отказов (частота появления отказов в некотором промежутке времени);
- средняя наработка на отказ (математическое ожидание наработки объекта до первого отказа) и др.

В настоящее время удалось довести без усложнения конструкции и схем питания удельное тяговое усилие с 0,8..0,9 до 1,2... 1,4 кН/кг (применение импульсных ЛЭМД с укороченной магнитной системой позволит при заданных значениях тягового усилия в конце рабочего хода снизить массу и добиться экономии активных материалов до 50%), повысить механическую энергию за цикл до 10^5 Дж (молоты). Моторесурс ЛЭМД в приводе насосов, прессов достигает десятков тысяч часов.

2.2. Моделирование магнитных систем (МС) ЛЭМД для операций маркирования и клеймения методом конечных элементов

С целью обоснования типа МС ЛЭМД для операций маркирования и клеймения применим метод моделирования с использованием готовых прикладных программных комплексов.

Запишем алгоритм выбора и обоснования типа магнитной системы в приводе устройства маркирования и клеймения.

1. Решим задачу магнитостатики для ЛЭМД с помощью одной из многих реализаций – программного комплекса Femm 4.0.

2. Рассчитаем распределение магнитного поля и определим усилия в магнитных системах различных типов ЛЭМД.

3. На основе сравнительного анализа тяговых характеристик различных ЛЭМД выберем тип МС ЛЭМД, соответствующий требуемой зависимости $F=f(\delta)$ (рис. 2.3).

Для моделирования тяговых характеристик рассматриваемого класса СЭМИС был выбран метод конечных элементов, применение которого позволяет устранить многие недостатки, присущие аналитическим методам. Для этого использована одна из множества реализаций метода конечных элементов – программа Femm [107, 108].

Работа в программе делится на три основных этапа.

Этап 1. Подготовка модели. В этот этап входит построение геометрии модели, разбивка области моделирования выбранным типом конечных элементов, задание свойств материалов.

Этап 2. Решение задачи моделирования. На этом этапе задаются области с токовыми нагрузками и граничные условия.

Этап 3. Анализ результатов. Получение результатов расчётов: линий векторного магнитного потенциала, вектора магнитной индукции, вектора напряженности магнитного поля и т.п. На этом этапе следует вычислить интегральную электромагнитную силу для заданной магнитодвижущей силы.

2.2.1. Постановка задач расчета стационарного электромагнитного поля в ЛЭМД

Математическим описанием непрерывных в пространстве и во времени магнитных полей в электромагнитных системах являются дифференциальные уравнения с частными производными. Так как рассматривается стационарная задача магнитостатики, то такие процессы описываются эллиптическими уравнениями Лапласа и Пуассона. Эти уравнения для электромагнитных полей

относительно характеристик поля (векторов напряженности электрического и магнитного полей \mathbf{E} и \mathbf{H} ; векторов электрической и магнитной индукции \mathbf{D} и \mathbf{B} ; векторного магнитного потенциала \mathbf{A} , скалярного электрического потенциала φ) получают из преобразования уравнений Максвелла [47, 71, 73].

Запишем простейшее эллиптическое уравнение Лапласа:

$$\Delta u = 0, \quad (2.1)$$

где $\Delta = \nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ – оператор Лапласа.

Моделируемые ЛЭМД цилиндрического типа, следовательно, наша магнитостатическая задача симметрична и будем решать ее в цилиндрической системе координат. В этих координатах расчетная область включает в себя половину вертикального сечения конструкции ЛЭМД; левая граница является осью симметрии конструкции, а остальные ее границы должны быть удалены настолько, чтобы влияние изучаемого электромагнитного поля на них было пренебрежимо мало.

В цилиндрической системе координат уравнение Лапласа имеет вид:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.2)$$

где $\varphi(r, \theta, z)$ – скалярная функция [56].

При моделировании МС ЛЭМД как нелинейной среды ($\mu \neq \text{const}$) магнитная проницаемость является функцией магнитной индукции:

$$\mu = \frac{B}{H(B)}, \quad (2.3)$$

где H – напряженность магнитного поля; $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды моделирования. С учетом (2.3) задача расчета будет рассматриваться как задача в неоднородной среде, поэтому из уравнений Максвелла получим:

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (2.4)$$

или

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu} \right) \times \text{rot} \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{j}, \quad (2.5)$$

в рассматриваемой задаче вектор индукции \mathbf{B} всегда лежит в плоскости модели Ozr , а вектор плотности стороннего тока \mathbf{j} и векторный магнитный потенциал \mathbf{A} перпендикулярны к ней. Отличны от нуля только компоненты \mathbf{j}_θ и \mathbf{A}_θ , обозначим их просто как j и A . Принимая в модели ЛЭМД, что ток, а следовательно, и векторный магнитный потенциал имеют только одну

составляющую, получим осесимметричную задачу магнитного поля, тогда уравнение Пуассона запишется:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_z \cdot r} \frac{\partial(r \cdot A)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r \cdot r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right), \quad (2.6)$$

где компоненты тензора магнитной проницаемости μ_r и μ_z (при нелинейной постановке задачи примем свойства ферромагнитного материала изотропными $\mu_r = \mu_z$), j – плотность тока и составляющие коэрцитивной силы H_{cr} , H_{cz} – постоянные величины в пределах каждого блока.

Решив данное уравнение и зная распределение векторного магнитного потенциала по области моделирования, можно найти распределение составляющих вектора магнитной индукции и результирующего значения (модуля) вектора магнитной индукции по выражениям

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}, \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}, \quad B = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}, \quad (2.7)$$

а затем суммарную электромагнитную силу, действующую на якорь ЛЭМД:

$$F = \frac{1}{2} \oint (\mathbf{H} \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) + \mathbf{B} \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) - \mathbf{n} \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{B})) \cdot ds, \quad (2.8)$$

где интегрирование ведется по поверхности s , окружающей заданный объем, а \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Для ЛЭМД цилиндрического типа как осесимметричной конструкции потокосцепление будет:

$$\Psi = 2\pi \cdot w \cdot \frac{\oint r \cdot A dq}{Q}, \quad (2.9)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор точки интегрирования и интегрирование ведется по поперечному сечению обмотки, а Q обозначает площадь этого поперечного сечения, w – количество витков обмотки.

Для того чтобы уравнения Лапласа-Пуассона имели единственное решение, они дополняются граничными (краевыми) условиями. На замкнутой границе Γ модели ЛЭМД заданы следующие краевые условия [59].

1. Граничные условия первого рода (Дирихле) - на границе Γ задается значение искомой функции, то есть $\varphi = f_1(r, \theta, z)$, где точки с декартовыми координатами (r, θ, z) принадлежат границе Γ . Условие $\varphi = 0$ является однородным.

2. Граничные условия второго рода (Неймана). Для них задается изменение искомой функции по нормали n к границе Γ , т.е. $d\varphi/dn = f_2(r, \theta, z)$, где точки с координатами (r, θ, z) принадлежат границе Γ . Условие $d\varphi/dn = 0$ является однородным.

3. Граничные условия третьего рода $d\varphi/dn + f_3(\varphi) = f_4(r, \theta, z)$, где точки с координатами (r, θ, z) принадлежат границе Γ .

На границе модели могут быть заданы смешанные краевые условия, т.е. сочетание вышеприведенных – первого, второго и третьего рода.

2.2.2. Сравнительный анализ МС ЛЭМД

Рассмотрим критерии оценки и сравнения различных МС ЛЭМД. Огромное разнообразие конструкций электромагнитных механизмов предъявляет повышенное требование к выбору и оптимальному проектированию СЭМИС, используемой в приводе устройства маркирования и клеймения. Решение этого вопроса в первую очередь предусматривает выбор рационального типа магнитной системы ЛЭМД, подтвержденный соответствующими технико-экономическими показателями: основными критериями оценки. К таким критериям можно отнести требования, которые предъявляются рассматриваемым технологическим процессом к ЛЭМД:

1. Вид механической характеристики электропривода $F_M = f(\delta)$.
2. Номинальный рабочий ход δ .
3. Удельное тяговое усилие ЛЭМД:

$$F_y = \frac{F_{\max}}{m}, \quad (2.10)$$

где F_{\max} – тяговое усилие ЛЭМД в точке механической характеристики, соответствующей максимальному противодействующему усилию; m – масса ЛЭМД.

4. Механический КПД электропривода:

$$\eta_M = \frac{A_M}{A_{И.Д}} \cdot 100\% = \frac{\int_0^{\delta} F_M(\delta) d\delta}{\int_0^{\delta} F_D(\delta) d\delta}, \quad (2.11)$$

где A_M – механическая работа ЛЭМД, необходимая для реализации технологического процесса; F_M – противодействующее усилие на якорь ЛЭМД со стороны маркируемого материала; $A_{И.Д}$ – динамическая интегральная работа, характеризующая зависимость механического усилия F_D , развиваемого ЛЭМД в динамическом режиме рассматриваемого рабочего хода δ его якоря.

Предлагаемые критерии позволят сделать предварительный выбор типа магнитной системы двигателя, удовлетворяющего всем особенностям рассматриваемой технологии, который может стать окончательным. Однако прежде всего следует учесть требуемую технологическим процессом (рис. 2.3) форму механической тяговой характеристики двигателя в приводе УМК, наиболее полно дающую представление о его магнитной системе.

Как показали исследования [3, 56], одним из главных требований в момент включения двигателя является получение максимальной начальной силы тяги и поддержание ее на высоком уровне в течение времени движения якоря. Анализ тяговых характеристик электромагнитных двигателей различных типов позволяет считать перспективными для целей силового привода в данных технологических операциях цилиндрические броневые ЛЭМД укороченной магнитной системы [80, 91], обладающие высокими энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления; данные исследования также показывают, что ЛЭМД с укороченной МС превосходят соответствующие базисные по величине интегральной работы на 23%, по величине конечного тягового усилия на 53%, но уступают по величине начального тягового усилия на 42%.

Целью данного моделирования является задача синтеза такой магнитной системы ЛЭМД, в которой за счет целенаправленного изменения геометрических параметров отдельных конструктивных элементов магнитной системы можно сформировать тяговую характеристику двигателя, удовлетворяющую технологическому требованию по тяговой силе в технологических процессах маркирования и клеймения при квазистатическом и ударном методах.

Для рассматриваемых типов МС ЛЭМД с втяжным якорем, которые можно использовать в приводе УМК, необходимо решить следующие задачи:

- рассчитать магнитоэстатическое осесимметричное поле в кусочно-однородной, нелинейной области ($\mu(H)$) для различных МС ЛЭМД;
- вычислить интегральные электромагнитные силы для рабочих диапазонов воздушных зазоров рассматриваемых магнитных систем ЛЭМД.

С целью обоснования конфигурации магнитной цепи ЛЭМД, обладающей необходимой работоспособностью, максимальным тяговым усилием в соответствующей точке противодействующей характеристики, проведём анализ тяговых характеристик броневых ЛЭМД цилиндрической структуры укороченной магнитной системы (рис. 2.3).

Математическая модель основана на следующих допущениях. Модель является двумерной. Для ферромагнитных материалов нелинейность магнитной проницаемости учитывается посредством таблицы заданных значений индукции и напряженности магнитного поля, которая аппроксимируется с помощью кубических сплайнов в функциональную зависимость $B = f(H)$. Магнитопровод и якорь у всех двигателей выполнены массивными из стальной поковки (сталь 10). Рассмотренные типы магнитных систем (рис. 2.3) имеют одинаковые массогабаритные показатели (внутренний и внешний диаметры обмотки: $d=48$, $D=80$ мм соответственно) и равные значения магнитодвижущей силы.

На рис.2.4 приведены статические тяговые характеристики ЛЭМД, принципиальные схемы которых изображены на рис. 2.3.

Сила тяги ЛЭМД с притягивающимся якорем (рис. 2.3, а) обусловлена магнитным потоком в рабочем зазоре и потоками выпучивания. Потоки рассеяния между центральным полюсом и ярмом не участвуют в создании тягового усилия и приводят к потере МДС, поэтому характеристика тяговой силы имеет вид резко падающей кривой с малым значением усилия в начале рабочего хода (рис. 2.4, кривая 1).

С целью максимального использования магнитного потока системы, увеличения запасаемой магнитной энергии, исключения паразитных зазоров, увеличения поверхности якоря, взаимодействующего со статором, предложены [4] ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами (рис.2.3, б, в, г).

Другой разновидностью ЛЭМД с комбинированным якорем и стопом служит СЭМИС, на якоре которой имеется кольцеобразный втяжной выступ (рис. 2.3, г). На большей части хода сила тяги такого ЛЭМД на 10-20 % выше, чем у ЛЭМД без характерного выступа (рис. 2.3, в). Такое увеличение тягового усилия объясняется тем, что кольцеобразный втяжной выступ играет роль магнитного шунта, благодаря которому при приближении якоря ЛЭМД к статору значительно возрастает проводимость рабочего зазора, увеличивается рабочий магнитный поток за счёт потоков рассеяния и выпучивания, текущих с цилиндрической части якоря на статор.

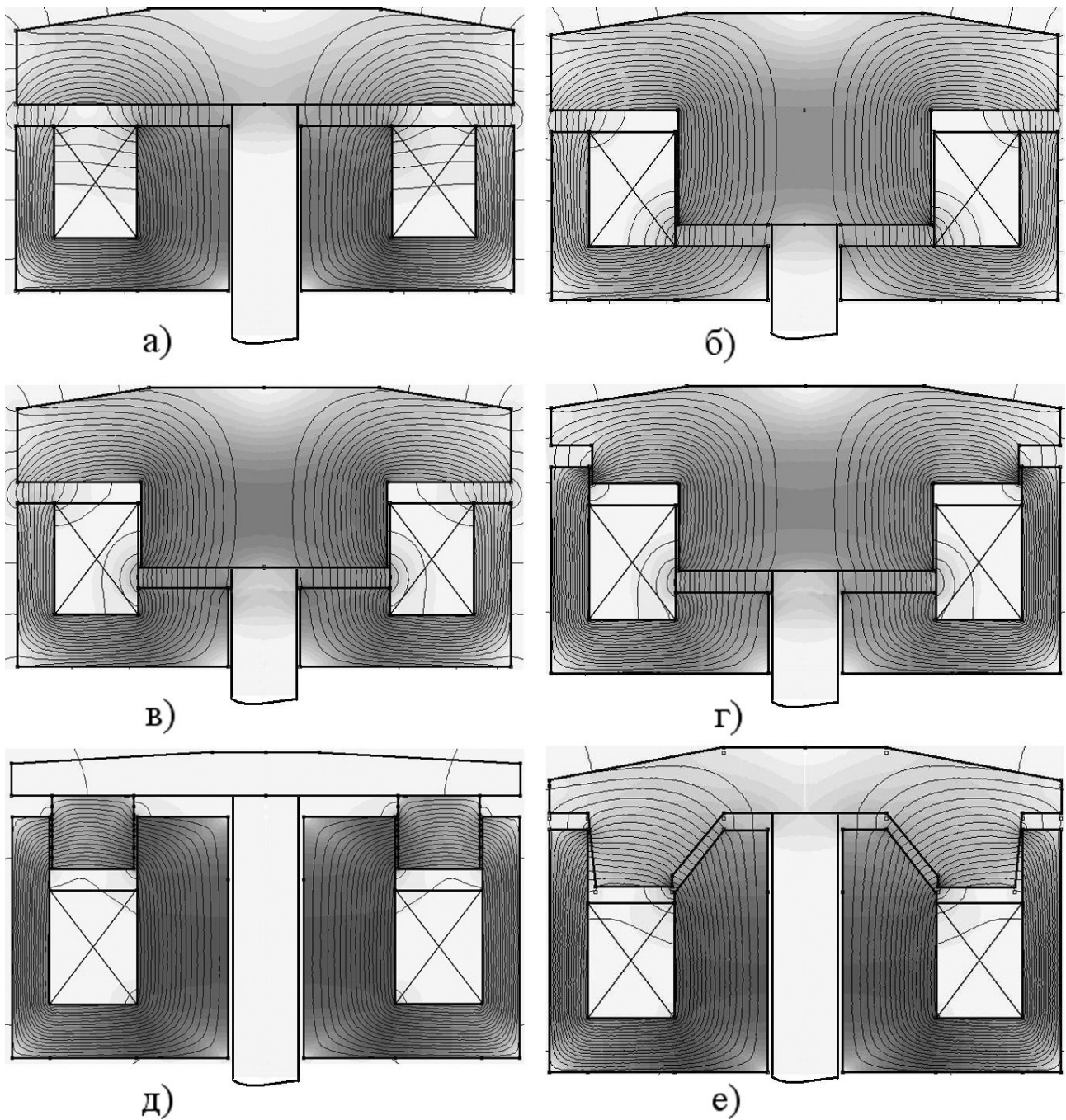


Рис.2.3. Схемы основных исследуемых магнитных систем ЛЭМД с распределением магнитных потоков: а – с притягивающимся плоским якорем; б – с комбинированным якорем без стопа; в – со стопом и с комбинированным якорем; г – со стопом и с комбинированным якорем, имеющим выступ; д – с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем; е - с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем

Наряду с ЛЭМД, имеющими втягивающийся внутрь катушки якорь, внешний притягивающийся или комбинированный якорь, применение находят также электромагниты с внешним якорем, движущимся поперечно по отношению к направлению рабочего магнитного потока (рис. 2.3, д). Подобные

электромагниты обладают худшими показателями добротности конструкции (отношениями веса электромагнита к его условной полезной работе), чем рассмотренные выше электромагниты, но характеристика тяговой силы имеет большие значения усилия в начале рабочего хода (рис. 2.4, кривая 5).

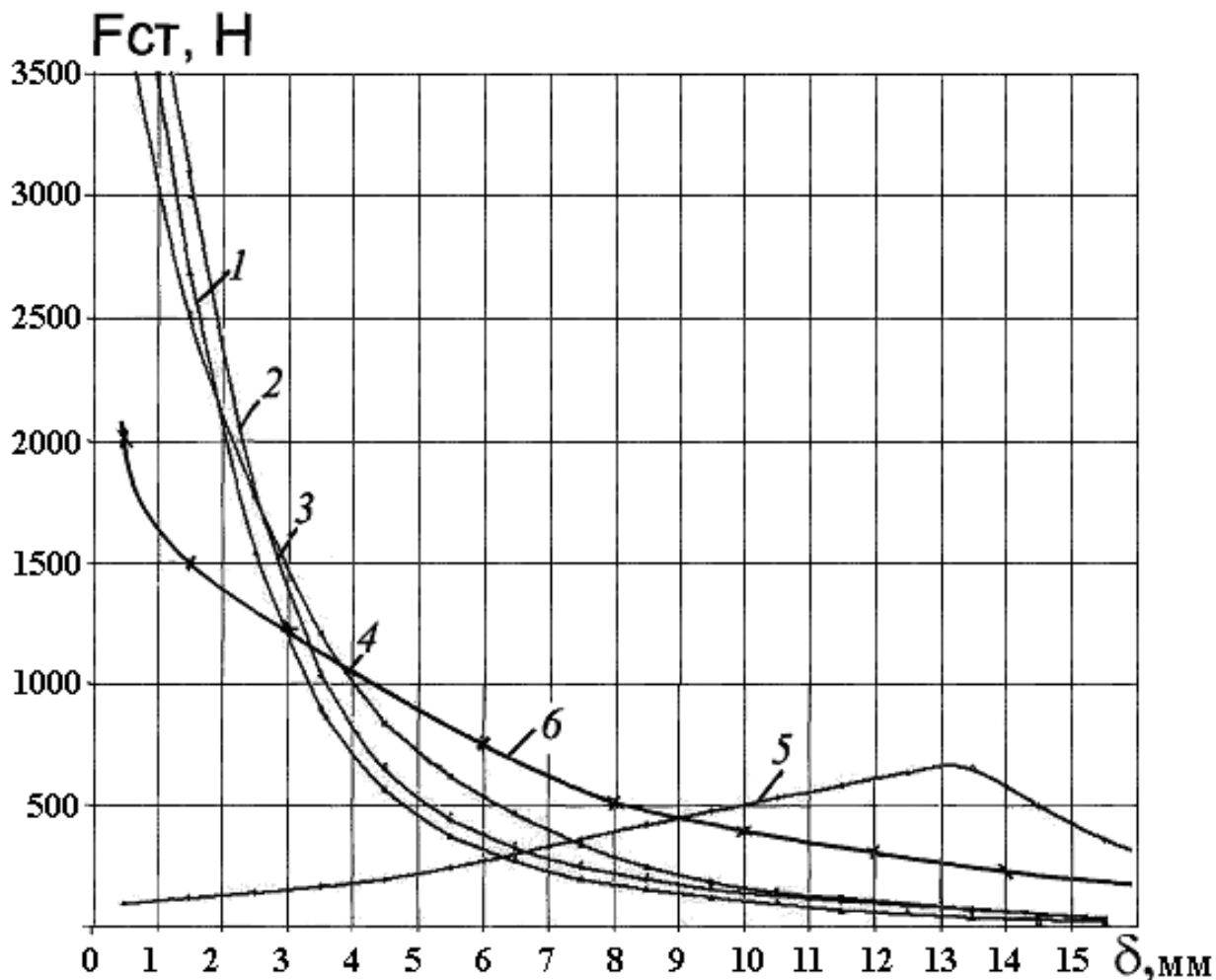


Рис. 2.4. Статические тяговые характеристики исследуемых магнитных систем ЛЭМД цилиндрической структуры: 1 – с притягивающимся плоским якорем; 2 – с комбинированным якорем без стопа; 3 – со стопом и с комбинированным якорем; 4 – со стопом и с комбинированным якорем, имеющим кольцеобразный выступ; 5 – с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем; 6 – с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем

Как следует из рис. 2.4, магнитные системы, соответствующие статическим тяговым характеристикам 2, 3, удовлетворяют требованиям маркирования ударным методом: максимальные усилия к концу рабочего хода.

Магнитные системы ЛЭМД (рис. 2.3, а-г) обладают высокими технико-экономическими показателями, но для операций квазистатического маркирования имеют существенный недостаток – их тяговая характеристика

имеет малые начальные тяговые силы, которые к концу рабочего хода резко возрастают.

При разработке новых и исследовании известных, но малоизученных магнитных систем был применен следующий подход. Стремление иметь характеристики ЛЭМД с крутым начальным фронтом импульса силы привело к идее совмещения положительных качеств у МС с продольным магнитным полем и у МС с поперечным магнитным полем. Исследование магнитных цепей различных типов магнитных систем ЛЭМД показало, что тяговую характеристику двигателя, имеющую схожий вид с механической характеристикой для технологических процессов маркирования и клеймения, можно получить лишь у ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем.

Поэтому для дальнейшего исследования была предложена укороченная магнитная система броневого ЛЭМД цилиндрической структуры с продольно-поперечным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем (рис. 2.3, *e*), обладающая повышенной начальной тяговой силой (рис. 2.4, кривая б) [99, 100]. В данном типе ЛЭМД за счет целенаправленного изменения одного геометрического параметра магнитной системы (изменение величины угла образующей α) можно сформировать тяговую характеристику двигателя, удовлетворяющую технологическому требованию по тяговой силе в технологических процессах маркирования и клеймения.

Известна [1] магнитная система ЛЭМД броневого типа, у которого начальные тяговые силы обладают высокими значениями, сравнимыми с усилиями в конце хода. Данный тип ЛЭМД содержит статор, обмотку, плоский внешний якорь с закрепленным ферромагнитным шунтом в виде кольца, имеющего внешнюю и внутреннюю цилиндрические поверхности. Недостаток известного прототипа заключается в наличии нерабочего воздушного зазора между фланцем и якорем при формировании тяговой характеристики.

2.2.3. Расчет осесимметричной МС ЛЭМД продольно-поперечного поля с учетом формирования требуемой тяговой характеристики

Расчет магнитостатического осесимметричного поля в кусочно-однородной, нелинейной области ($\mu(H)$) покажем для ЛЭМД продольно-поперечного поля с втяжным якорем. Исследуется модель в плоскости rOz декартовой системы координат. Геометрия двумерной модели представлена на рис. 2.5. Исходное дифференциальное уравнение в частных производных записывается относительно θ -составляющей векторного магнитного потенциала (A_θ).

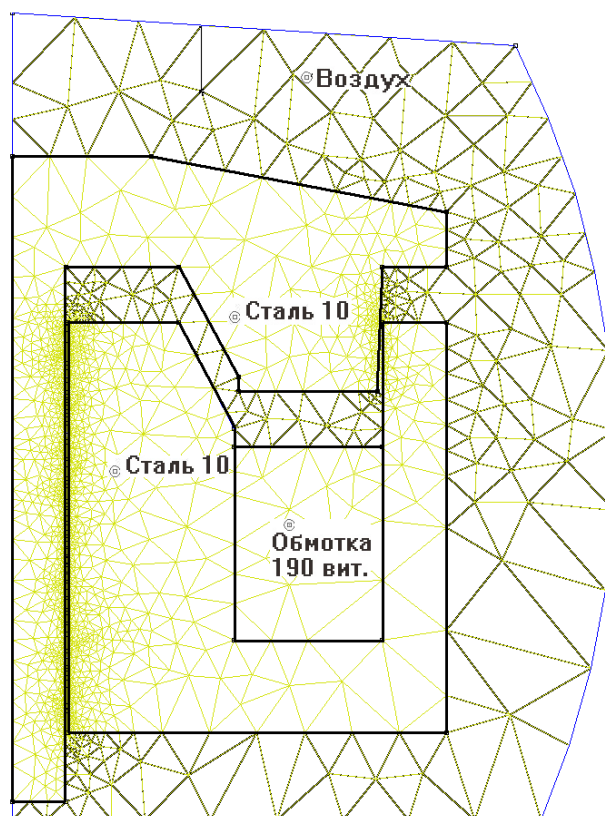


Рис. 2.5. Геометрия двумерной модели с сеткой треугольных элементов

Далее строится модель ЛЭМД и картина эквипотенциальных линий модуля вектора магнитной индукции в данной модели (рис. 2.5). После распределения силовых линий магнитного поля определяется электромагнитная сила по формуле Максвелла (2.8) в выражении для натяжения на произвольно ориентированной в магнитном поле поверхности [27]:

$$\bar{T}n = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} (\bar{B} \cdot Bn - \frac{1}{2} B^2 \cdot \bar{n}), \quad (2.12)$$

соответственно полная сила, действующая на объем V , выделенный поверхностью S , определяется путем интегрирования элементарных сил $d\bar{F} = \bar{T}n \cdot dS$, действующих в магнитном поле на элемент dS поверхности S со стороны нормали, т.е. снаружи:

$$\bar{F} = \oint_S \bar{T}n \cdot dS, \quad (2.13)$$

где \bar{B} – вектор индукции в рассматриваемой точке поверхности; $\mu_r \mu_0$ – магнитная проницаемость среды в этой точке; \bar{n} – нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует вектор натяжения $\bar{T}n$;

B_n – нормальная составляющая индукции.

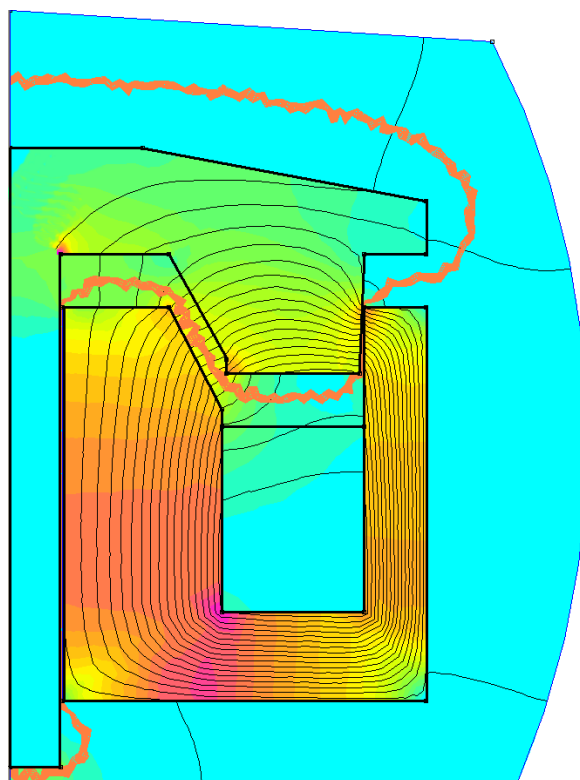


Рис. 2.6. Картина эквипотенциальных линий модуля вектора магнитной индукции в модели ЛЭМД с обозначенным тензором натяжений

В исследуемой магнитной системе объединены несколько электромеханических преобразователей с различными видами магнитных потоков (продольного, поперечного, рассеяния и выпучивания), действующих одновременно в пределах определенной части рабочего хода. Статические тяговые характеристики ЛЭМД продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и якорем при различных углах образующей рассчитаны по формуле (2.9) и представлены на рис. 2.7.

На рис. 2.7 представлены статические тяговые характеристики ЛЭМД укороченной магнитной системы с продольно-поперечным полем при изменении величины угла образующей. Из анализа этих статических тяговых характеристик следует, что при увеличении угла образующей характеристика приближается к магнитной системе ЛЭМД с поперечным полем, а при уменьшении – ЛЭМД с продольным полем. Это выгодно отличает рассматриваемые системы с продольно-поперечным полем от аналогичных систем других конструкций. Зависимость \mathcal{Z} имеет относительно постоянную силу тяги на всем рабочем диапазоне ходов.

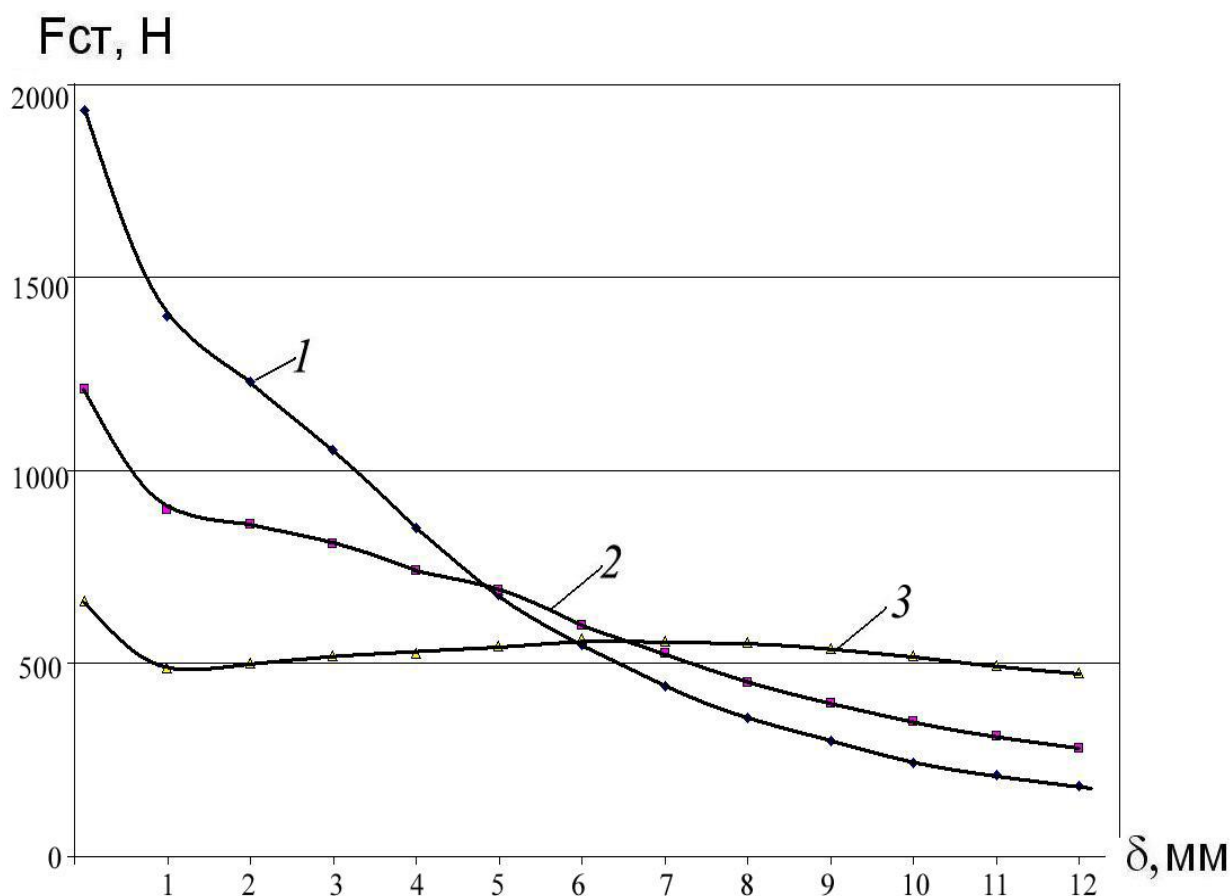


Рис. 2.7. Статические тяговые характеристики ЛЭМД укороченной магнитной системы с продольно-поперечным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем при угле образующей: 1 – $\alpha=30^\circ$; 2 – $\alpha=60^\circ$; 3 – $\alpha=80^\circ$

Полученные статические тяговые характеристики были проверены экспериментально на изготовленной физической модели ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем (угол образующей 30°) для привода устройства маркирования и клеймения (рис. 2.11). Расчетная статическая тяговая характеристика удовлетворительно совпадает с экспериментальной (рис. 2.8).

Расчет среднеквадратичной погрешности среднего результата измерения тягового усилия в серии экспериментов дает значение 5,7%. Расхождение в параметрах между теоретическими и экспериментальными данными обусловлено как существующими погрешностями измерений, так и разбросом параметров магнитных характеристик стали магнитной системы ЛЭМД. Таким образом, результаты теоретических расчетов моделирования согласуются с экспериментальными данными (рис.2.8), что подтверждает пригодность данного моделирования для ЛЭМД рассматриваемого типа. Нагрузочная характеристика ЛЭМД продольно-поперечного поля при рабочем воздушном зазоре $\delta=\text{const}=5\text{мм}$ представлена на рис. 2.9.

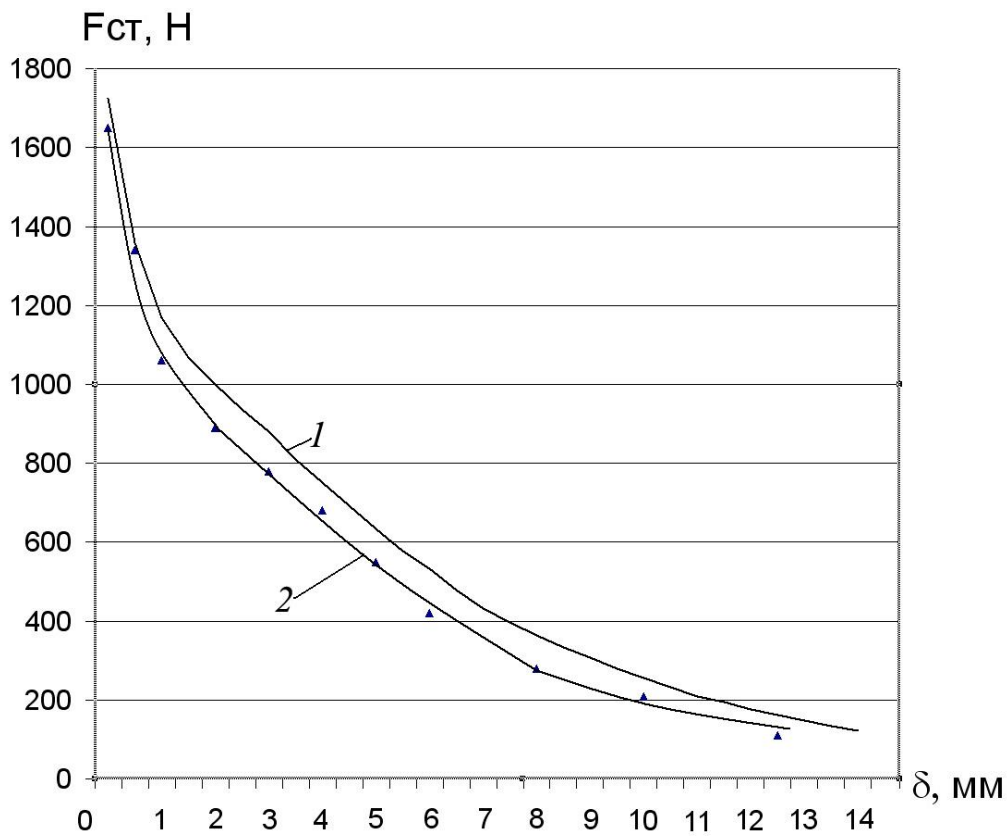


Рис.2.8. Статические тяговые характеристики ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем, конусно-усеченным полюсом и якорем ($\alpha=30^\circ$): 1 - результат моделирования; 2- эксперимент

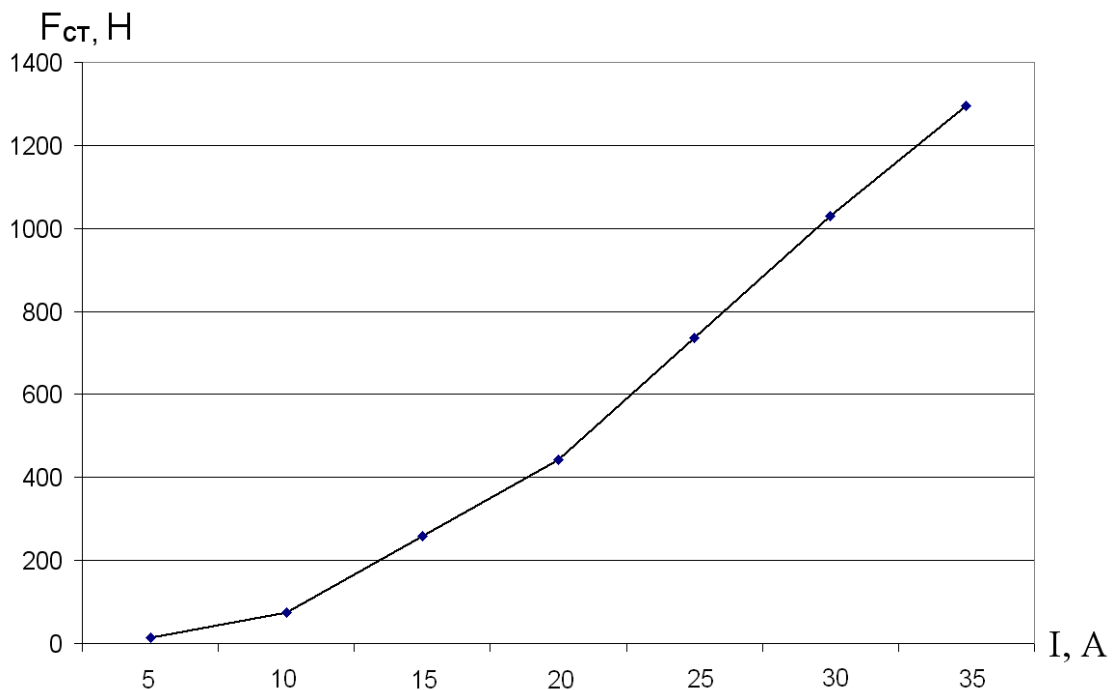


Рис. 2.9. Нагрузочная характеристика ЛЭМД продольно-поперечного поля при рабочем воздушном зазоре $\delta = \text{const} = 5$ мм

2.3. Конструкции ЛЭМД для операций маркирования и клеймения

В основу конструктивного решения импульсного устройства маркирования и клеймения при ударном и квазистатическом методах положена идея применения в качестве привода СЭМИС с укороченной МС, возбуждаемой от схемы питания, обеспечивающей энергопреобразование в импульсной режиме. Это решение позволило обеспечить КПД преобразования энергии, потребляемой от емкостного накопителя, в среднем 20-30% и развивать высокие значения удельных тяговых усилий при малом рабочем воздушном зазоре длительностью 5...8 мс, что и определило эффективное создание необходимой работы деформации в маркировочных работах при заданных рабочих зазорах и номенклатуре деталей и изделий.

Предложенный ЛЭМД с конусно-усеченным якорем и двумя рабочими зазорами наиболее полно обеспечивает технологические требования, когда при выполнении операций маркирования, клеймения требуется квазистатическое усилие, под действием которого металл заготовки получает пластическую деформацию. Для обеспечения высоких значений усилий воздействия при маркировании и клеймении квазистатическим методом для малых рабочих воздушных зазоров необходимо объединить данный привод с механическим трансформатором усилий, расчет которого приведен в [24].

В результате моделирования был синтезирован новый тип ЛЭМД укороченной магнитной системы продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и якорем (рис. 2.10, б). Разработанная конструкция МС ЛЭМД продольно-поперечного поля обеспечивает требуемую тяговую характеристику для безударного маркирования и клеймения деталей и изделий.

Конструкции ЛЭМД обоих типов МС (рис.2.10) имеют ферромагнитные якорь 1 и статор в виде внешнего магнитопровода 3. Якорь перемещается в направляющих немагнитных втулках. На торце якоря у обоих МС устанавливается сменный наконечник-клеймитель из высокопрочного твердого материала.

Конструкция ЛЭМД продольно-поперечного поля была использована для маркирования и клеймения квазистатическим методом (рис. 2.12).

Для операций маркирования и клеймения ударным методом применена конструкция МС с комбинированным якорем и статором, она удовлетворяет требованиям маркирования ударным методом: максимальные усилия к концу рабочего хода, обеспечение запаса прочности якоря к ударным нагрузкам. Следует отметить, что рабочий ход якоря-бойка 1 является участком разгона. После нанесения ударным методом маркировки якорем-бойком с клеймителем на деталь или изделие импульс на обмотку СЭМИС прекращается, и под действием возвратной пружины 5 боек возвращается в исходное положение. СЭМИС характеризуется весьма большими возвратно-поступательными

перемещениями якоря, которые можно изменять путем установки распорной втулки между якорем и верхней крышкой. Фотографии изготовленной конструкции ЛЭМД укороченной магнитной системы с комбинированным якорем и его конструктивные элементы приведены на рис. 2.11.

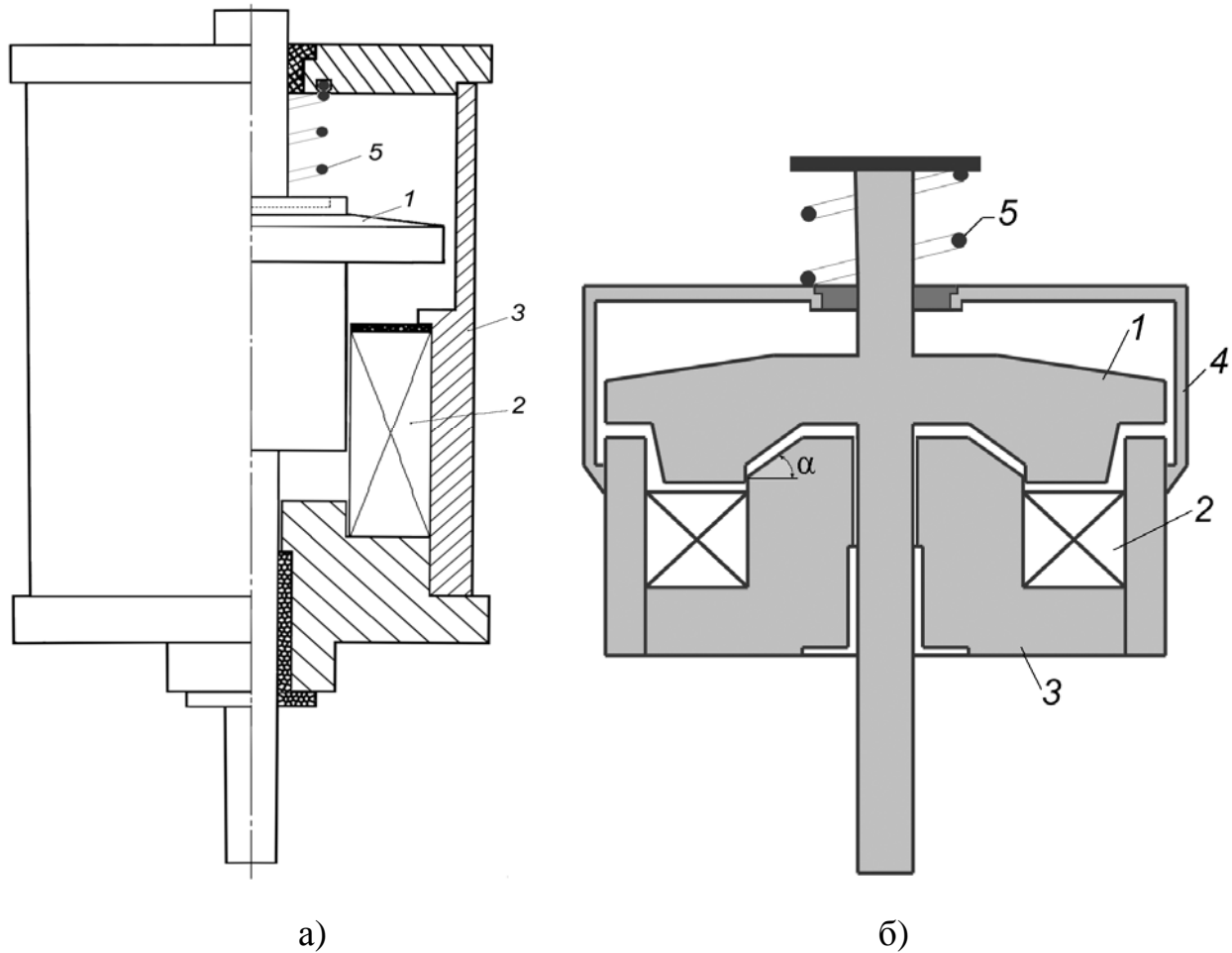
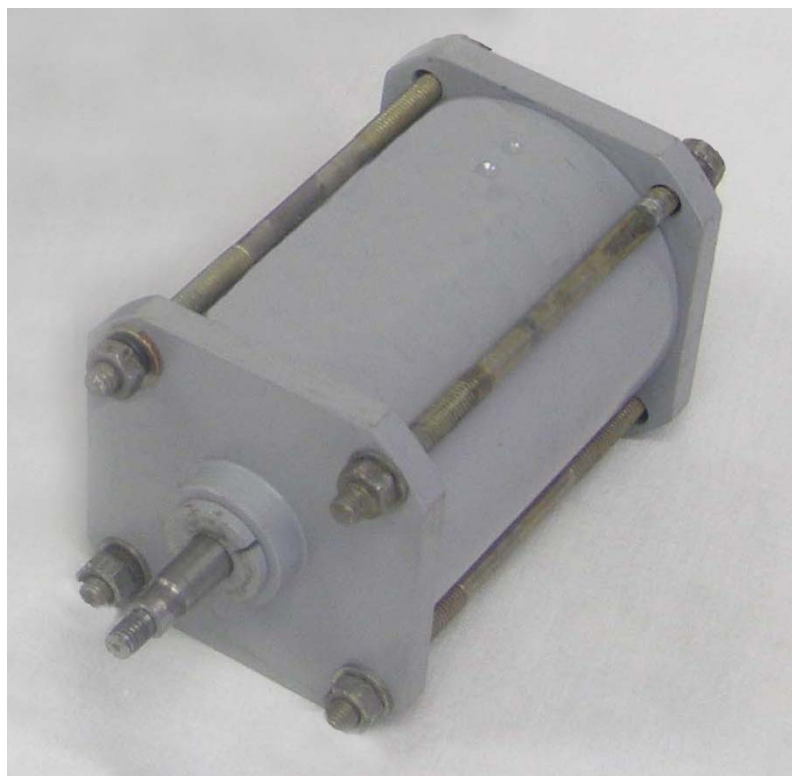


Рис.2.10. Конструкции ЛЭМД для операций маркирования и клейменения:
 а) с комбинированным якорем и статором – ударный метод; б) продольно-поперечного поля – квазистатический метод: 1, 3 – ферромагнитные якорь и статор, 2 – обмотка возбуждения, 4 – направляющий корпус, 5 – пружина, α – угол образующей



а)



б)

Рис. 2.11. Конструкция (а) и конструктивные элементы (б) ЛЭМД укороченной магнитной системы с комбинированным якорем и статором:
 1 – корпус; 2 – обмотка возбуждения; 3 – якорь; 4 – фланец со стопом;
 5 – возвратная пружина; 6 – шпильки; 7 – крышка с направляющей втулкой



a)



б)

Рис. 2.12. Конструкция (а) и конструктивные элементы (б) ЛЭМД продольно-поперечного поля укороченной магнитной системы с конусно-усеченным полюсом и якорем: 1 – корпус МС с обмоткой возбуждения; 2 – крышка с направляющей; 3 – якорь; 4 – гайки; 5 – возвратная пружина; 6 – шток; 7 – клеймитель

2.4. Схемы питания и управления СЭМИС в УМК

При разработке схемного решения УМК с регулированием и стабилизацией напряжения заряда основной задачей является выбор силовой схемы преобразователя и алгоритмов управления им. Основанием для выбора силовой схемы служат технические и экономические требования, предъявляемые к этим устройствам, как со стороны потребителей, так и со стороны производителей электроэнергии. К ним относятся требования по качеству и экономичности потребляемой входной и выходной энергии на этапе эксплуатации устройства, а также требования по массе и по экономии активных материалов как носителей энергозатрат на этапе изготовления схемного решения и комплектующих изделий.

Импульсные устройства маркирования и клеймения как потребители электрической энергии характеризуются рядом свойств, существенно отличающих их от потребителей обычного типа, заключающихся непрерывным накоплением энергии в конденсаторе при периодическом их разряде.

Для УМК следует разработать схему питания, которая преобразует и передает энергию источника питания в накопительные конденсаторы и по сигналу управления от оператора разряжается на обмотку возбуждения СЭМИС. СЭМИС в устройстве маркирования и клеймения потребляет импульсную накопленную в конденсаторе энергию, что ставит задачу выбора систем заряда накопительных конденсаторов и исследования процессов в этих системах с целью повышения энергетических показателей, уменьшения габаритов и массы. Нужно отметить, что необходимое дозирование энергии удара в процессах маркирования требует наличия в схеме регулирования энергии заряда.

В литературе приводятся описания и исследования самых различных схем преобразователей в системах заряда ЕНЭ [77, 87].

При питании от промышленной сети особенность преобразователя для данных устройств заключается в обеспечении заряда накопительных конденсаторов в интервале времени, соответствующем большему числу периодов напряжения источника. Согласно техническим требованиям, время, предоставляемое для передачи энергии от источника в накопительный конденсатор, на два и более порядка превышает длительность разрядного импульса, поэтому процессы в цепях разряда сравнительно слабо влияют на процессы передачи энергии от источника в накопитель. Только при таком условии будут обеспечены рациональные режимы работы системы заряда накопительных конденсаторов.

К схемам питания и управления зарядных устройств в приводе УМК предъявляются следующие требования:

- возможность регулирования напряжения заряда ЕНЭ;
- обеспечение стабильности заряда в требуемых пределах;

- простота устройства;
- надежность функционирования;
- минимальные массогабаритные показатели;
- невысокая стоимость.

Рассмотрим зарядные цепи, содержащие активный токоограничительный элемент. Эти цепи уступают зарядным цепям с реактивными токоограничительными элементами по КПД из-за больших потерь энергии в резисторах. Однако отсутствие переходных процессов в схеме при первоначальном включении и, как следствие, отсутствие перенапряжений, простота и надежность, меньшая стоимость резисторов по сравнению со стоимостью дросселей и конденсаторов являются причиной того, что зарядные цепи с активными токоограничительными элементами получили наиболее широкое применение в практике [77].

Простейшим схемотехническим решением для данной задачи может служить автотрансформаторная регулируемая схема заряда ЕНЭ, содержащая автотрансформатор, на выходе которого установлен выпрямитель - диодный мост, от которого последовательно соединены токоограничивающий резистор (или дроссель для увеличения КПД) и накопительный конденсатор с последующим разрядом через тиристор на обмотку СЭМИС. Достоинства данной схемы – ее простота, надежность; недостатки – низкий КПД заряда, громоздкость. Такая схема применима только при стационарных лабораторных испытаниях.

Реализация регулирования и стабилизации параметров разрядных импульсов возможна либо путем изменения структуры формирователя разрядных импульсов в момент их протекания, либо путем регулирования начальных условий разряда. Первая группа методов наилучшим образом реализуется с помощью полностью управляемых ключей в разрядном контуре. Недостаток – относительная сложность устройства. Применение частично управляемых ключей (тиристоров) для подключения дополнительных накопителей энергии либо изменения структуры формирователя позволяет оперативно регулировать длительность и амплитуду импульсов. Следует отметить бесспорные достоинства данного метода – оперативность и приемлемую точность регулирования для операций маркирования и клеймения.

В зарядных устройствах, рассматриваемых для СЭМИС, в приводе устройств маркирования и клеймения рационально применять тиристорные схемы коммутации тока с заданным начальным режимом заряда накопительных конденсаторов. Эти требованиям удовлетворяют две схемы питания СЭМИС с предварительным зарядом ЕНЭ для операций маркирования и клеймения, представленные на рис. 2.13. Схемы на основе электронного регулятора напряжения позволяют исключить автотрансформатор и тем самым улучшить массогабаритные показатели зарядного устройства ЕНЭ.

На рис. 2.13, а представлена схема с плавным регулированием амплитуды импульсов тока в СЭМИС, в которой осуществляется заряд конденсатора до различных напряжений путем изменения угла включения зарядного тиристора с помощью фазорегулирующего блока управления зарядом – тиристорная схема управления напряжением заряда ЕНЭ на однопереходном транзисторе.

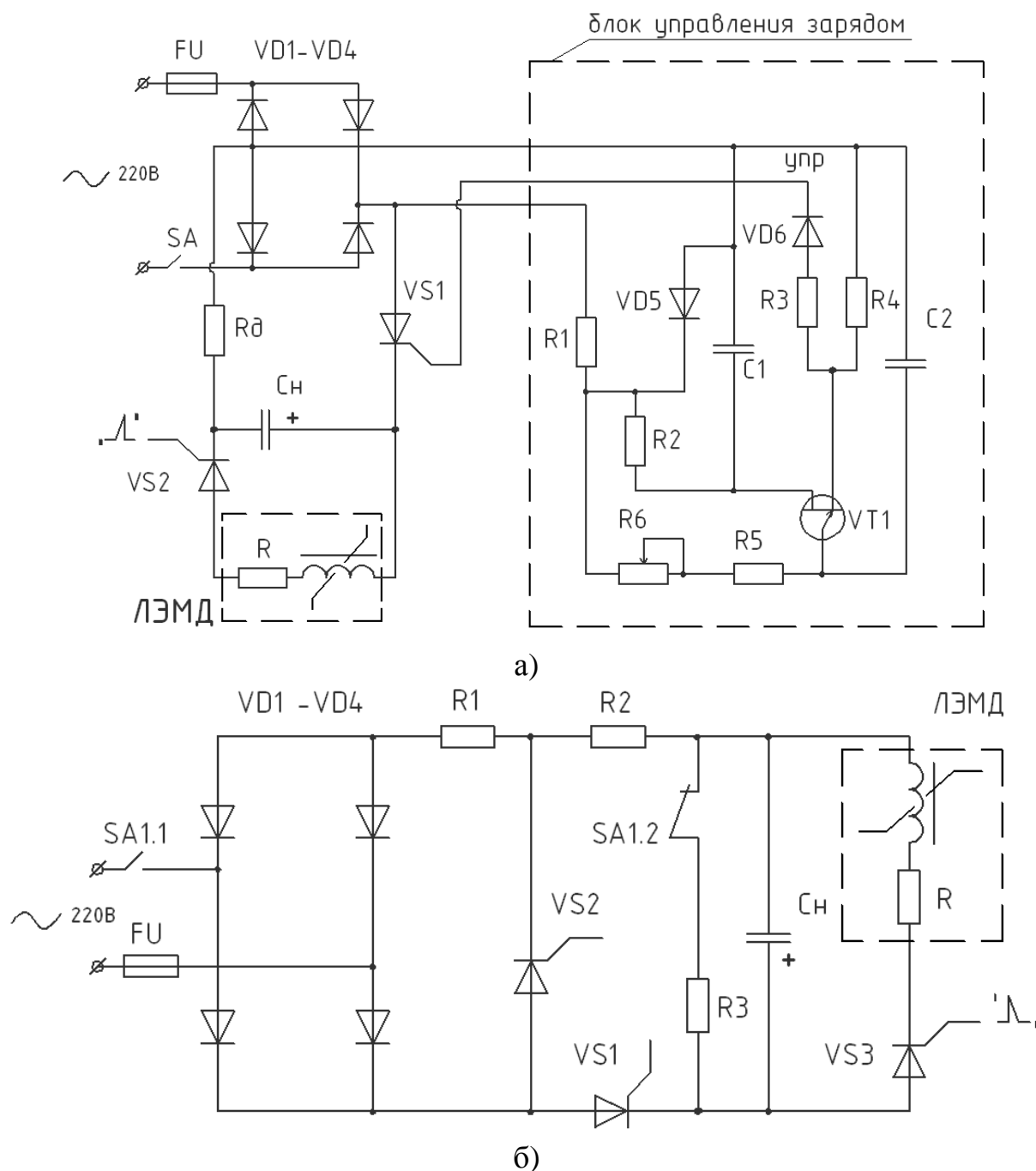


Рис. 2.13. Электрические схемы питания СЭМИС в УМК

Электрическая схема блока управления зарядом ЕНЭ собрана на однопереходном транзисторе и является типовой [87]. На однопереходном транзисторе VT1 собран генератор импульсов, синхронизированных с периодом пульсаций сетевого напряжения, коммутация зарядных импульсов производится с помощью тиристора VS1. Питается схема управления без

трансформатора, непосредственно от сети 220 В через выключатель SA и предохранитель FU, выпрямитель и резистор R1. Емкостной накопитель электрической энергии C_n заряжается от сети однофазного переменного напряжения через зарядное устройство, включающее в себя блок выпрямителей VD1-VD4, токоограничивающий резистор R δ и зарядный тиристор VS1, управляющий зарядом импульсного накопительного конденсатора C_n . Величина значения напряжения на ЕНЭ устанавливается с помощью изменения резистором R6 угла открывания тиристора VS1. По окончании процесса заряда ЕНЭ коммутация рабочего импульса от заряженного ЕНЭ производится с помощью мощного тиристора VS2. При подаче отпирающего импульса оператором на управляющий электрод от ждущего мультивибратора (на схеме не показан) открывается силовой тиристор VS2 и емкость C_n разряжается на обмотку возбуждения СЭМИС. При колебательном режиме разряда для устранения перезаряда емкости C_n и избежания выхода из строя используемых электролитических конденсаторов в рассматриваемой схеме обмотку возбуждения следует шунтировать диодом.

Анализ работы импульсного источника данной схемы показывает, что ее регулировочные возможности ограничены. Этот недостаток ограничивает применение данной схемы при строго дозированных энергиях удара в устройствах маркирования и клеймения, требующих прецизионного воздействия инструмента на маркируемый материал изделия.

На рис. 2.13, б изображена другая принципиальная схема силовой электрической части машины УМК-1. Данная схема используется в установках контактной сварки [62, 87]. Заряд батареи производится от неуправляемого мостового выпрямителя VD1-VD4 через тиристор VS1 и токоограничительные резисторы R1 и R2. Мостовой выпрямитель VD1-VD4 подключается непосредственно к сети через предохранитель FU1 и выключатель SA. Выключатель SA состоит из двух контактов: при положении «Включено» - нормально замкнутого SA1.1, включающего питание от сети, и разомкнутого контакта SA1.2, который включен в цепь резистора R3, предназначенного для шунтирования батареи C_n при отключении выпрямителя VD1-VD4 от сети «Отключено».

Тиристор VS2 служит для шунтирования зарядного выпрямителя VD1-VD4 в момент достижения напряжения на конденсаторах батареи C_n заданного уровня. Применение шунтирующего тиристора VS2 обеспечивает высокую стабильность рабочего напряжения на накопительных конденсаторах УМК-1. Для ограничения шунтирующего тока последовательно с VS2 включен резистор R1.

Разряд батареи на обмотку СЭМИС осуществляется после подачи отпирающего импульса от системы управления на тиристор VS3. Импульсы разрядного тока батареи следуют через обмотку СЭМИС в одном направлении. На схеме параметр R в общем случае учитывает наличие потерь на гистерезис и вихревые токи в МС, а также активное сопротивление разрядного контура. Таким образом, в схемах силовых цепей (рис. 2.13, б) под R, L необходимо понимать суммарные эквивалентные параметры, учитывающие также

сопротивления и индуктивности подводящих проводов, вентиля, конденсаторов и контактных перемычек между ними.

Рассмотрим принципы принудительного выключения зарядного тиристора схемы (рис. 2.13, б). Зарядная цепь в этой схеме является однофазной. Заряд и стабилизация напряжения на батарее конденсаторов C_n в зарядной цепи осуществляются следующим образом. На зарядный тиристор VS1 подаются управляющие импульсы повышенной частоты (до 1 кГц), что обеспечивает максимальный угол проводимости тиристора во время заряда, а вместе с ним и минимальное время заряда. В литературе [77] отмечалось, что в этом режиме работы тиристор подобен диоду, поэтому расчет времени заряда и других параметров схемы можно производить по методам, изложенным в данной монографии. По достижении заданного напряжения на батарее конденсаторов C_v в схеме управления (на рисунке не показана) срабатывает спусковое устройство-компаратор, которое сравнивает два сигнала – опорный с переменного резистора и напряжение на ЕНЭ и выдает сигнал на управление зарядкой, в результате чего выдается импульс на включение шунтирующего тиристора VS2 и прекращаются импульсы, включающие тиристор VS1. Тиристор VS2 включается, тиристор VS1 выключается, при этом зарядный ток коммутируется с последнего на первый. Процесс коммутации тока здесь протекает очень быстро за счет того, что к тиристорам VS1 при включении VS2 прикладывается обратное напряжение, равное напряжению на батарее конденсаторов C_n . При включении тиристора VS2 может подаваться световой или звуковой сигнал о заряде конденсатора. Шунтирующий тиристор VS2 выключается естественным образом, когда напряжение на выходе мостового выпрямителя VD1-VD4 достигает нулевого значения. Оператор подает запускающий импульс на ждущий мультивибратор, который включает тиристор VS3, осуществляющий разряд на обмотку возбуждения СЭМИС.

Рассмотренная схема на рис. 2.13, б проста, надежна в эксплуатации, для нее характерны следующие свойства: во-первых, применение этой схемы ограничено однофазными цепями заряда в связи с естественным режимом выключения тиристора VS2; во-вторых, заряд обусловлен режимами малых токов, так как большие значения зарядного тока связаны с уменьшением сопротивлений резисторов R1 и R2, увеличением постоянной времени шунтирующей цепи и вследствие этого с ухудшением условий выключения шунтирующего тиристора VS2.

Для обеих схем (рис. 2.13) сформулируем общие характерные положения.

1. Регулирование величины энергии удара СЭМИС зарядным устройством обеспечивается за счет изменения напряжения заряда емкости C_n .

2. С точки зрения потребляемой из сети мощности понятие КПД заряда ЕНЭ для импульсных устройств маркирования не имеет существенного значения, но слишком малый КПД может сказаться на возрастании массогабаритных показателей установки.

3. Батарея конденсаторов C_n состоит из набора импульсных

конденсаторов и для увеличения КПД может быть разделена на секции (при работе специальным переключателем обеспечивается регулирование величины емкости батареи ступенями). В случае применения дискретного регулирования емкости ограничивающее сопротивление регулируется с помощью переключателя одновременно с изменением емкости батареи (сопротивление увеличивается при уменьшении емкости и наоборот), что способствует стабилизации заданного напряжения на ЕНЭ устройства.

4. Все параметры импульсного конденсатора и предъявляемые к нему требования определяются исключительно требуемой энергией воздействия и параметрами схемы замещения СЭМИС. В связи с этим исключается возможность выбора параметров конденсатора исходя из целесообразных режимов работы системы заряда.

3. ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЛЭМД НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ СЭМИС

3.1. Влияние предыстории намагничивания магнитной системы ЛЭМД на его энергетические показатели

Обычно в расчетах силовых электромагнитных импульсных систем не учитывают остаточный магнетизм, который связан с явлением гистерезиса в магнитной системе [8]. Однако при экспериментальном исследовании энергетических показателей ЛЭМД при питании от ЕНЭ было установлено, что значение энергии удара существенно зависит от предыстории импульсного намагничивания МС [74, 75]. Поэтому в устройствах с линейными электромагнитными приводами допущение о пренебрежении предыстории намагничивания МС приводит к существенным разбросам величины энергии удара, что является недопустимым, например, при использовании СЭМИС в технологических операциях маркирования и клеймения, динамического испытания материалов и других случаях, требующих стабильных значений энергии воздействия.

Рассмотрим вопрос о влиянии предыстории намагничивания магнитной системы ЛЭМД на значение энергии удара и обоснуем рабочий цикл, при котором обеспечивается высокая эффективность энергопреобразования.

В импульсном динамическом режиме намагничивания ферромагнитного материала связь между магнитной индукцией B и напряженностью H согласно [72] выражается зависимостью:

$$B = \varphi \left(H, \frac{dH}{dt}, \frac{d^2H}{dt^2}, \dots, \frac{dB}{dt}, \frac{d^2B}{dt^2} \right), \quad (3.1)$$

из которой следует, что для полного описания поведения материала в динамическом режиме необходимо учитывать не только скорости изменения напряженности и индукции магнитного поля, но и производных величин более высокого порядка.

Рассмотрим процесс намагничивания МС ЛЭМД последовательностью униполярных импульсов со скважностью, достаточной для того, чтобы ток намагничивания успевал спадать до нуля к приходу следующего импульса. На данном этапе влияние вихревых токов, потоков рассеяния не учитываются. В дальнейшем их влияние будет учтено.

Пусть на обмотку возбуждения воздействуют импульсы напряжения прямоугольной формы длительностью t_u :

$$\begin{aligned} u &= 0 \text{ при } t < 0; \\ u &= U \text{ при } 0 < t < t_u; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$u = 0 \text{ при } t > t_u,$$

а электромагнитные свойства стали МС характеризуются предельным статическим гистерезисным циклом – $H_C, B_S, +H_C$.

Напряжение, приложенное к обмотке ЛЭМД, уравнивается индуцируемой в обмотке электродвижущей силой:

$$u = -e = w \frac{d\Phi}{dt} = wS_{\text{я}} \frac{dB}{dt}, \quad (3.3)$$

где $d\Phi = dB \cdot S_{\text{я}}$ – изменение магнитного потока за время dt ;

B – индукция в МС ЛЭМД; $S_{\text{я}}$ – активная площадь сечения якоря МС.

Определяя индукцию из формулы (3.3) с учетом условий (3.2), получим:

$$B(t) = B(0) + \frac{1}{wS_{\text{я}}} \int_0^t U dt, \quad (3.4)$$

где $B(0)$ – начальное значение индукции в МС, соответствующее моменту времени $t = 0$.

При импульсном намагничивании свойства ферромагнитной системы характеризуются средней проницаемостью на частном цикле [33]:

$$\mu_{\text{имп}} = \frac{\Delta B_{\text{имп}}}{\mu_0 \Delta H_{\text{имп}}}, \quad (3.5)$$

где $\Delta H_{\text{имп}}$, $\Delta B_{\text{имп}}$ – приращения напряженности и индукции импульсного магнитного поля соответственно.

Запишем формулу (3.4) не для абсолютного значения индукции в МС, а для ее приращения во времени:

$$\Delta B(t) = B(t) - B(0) = \frac{1}{wS_{\text{я}}} \int_0^t U dt. \quad (3.6)$$

С учетом (3.2) выражение (3.6) примет вид:

$$\Delta B = \Delta B(t) = \frac{U t_{\text{и}}}{wS_{\text{я}}}, \quad (3.7)$$

откуда видно, что приращение индукции в интервале времени $t_{\text{и}}$ нарастает линейно.

При питании ЛЭМД магнитное состояние материала МС изменяется по частным динамическим циклам. На рис. 3.1 показан переход к установившемуся частному гистерезисному циклу (AB_r) из исходного размагниченного состояния МС ($H=0, B=0$) при подаче на обмотку возбуждения ЛЭМД ряда последовательных однополярных и одинаковых по величине импульсов напряжения. Выше точки B_r индукция подняться не может,

так как эта точка лежит на пересечении предельной петли гистерезиса с осью координат.

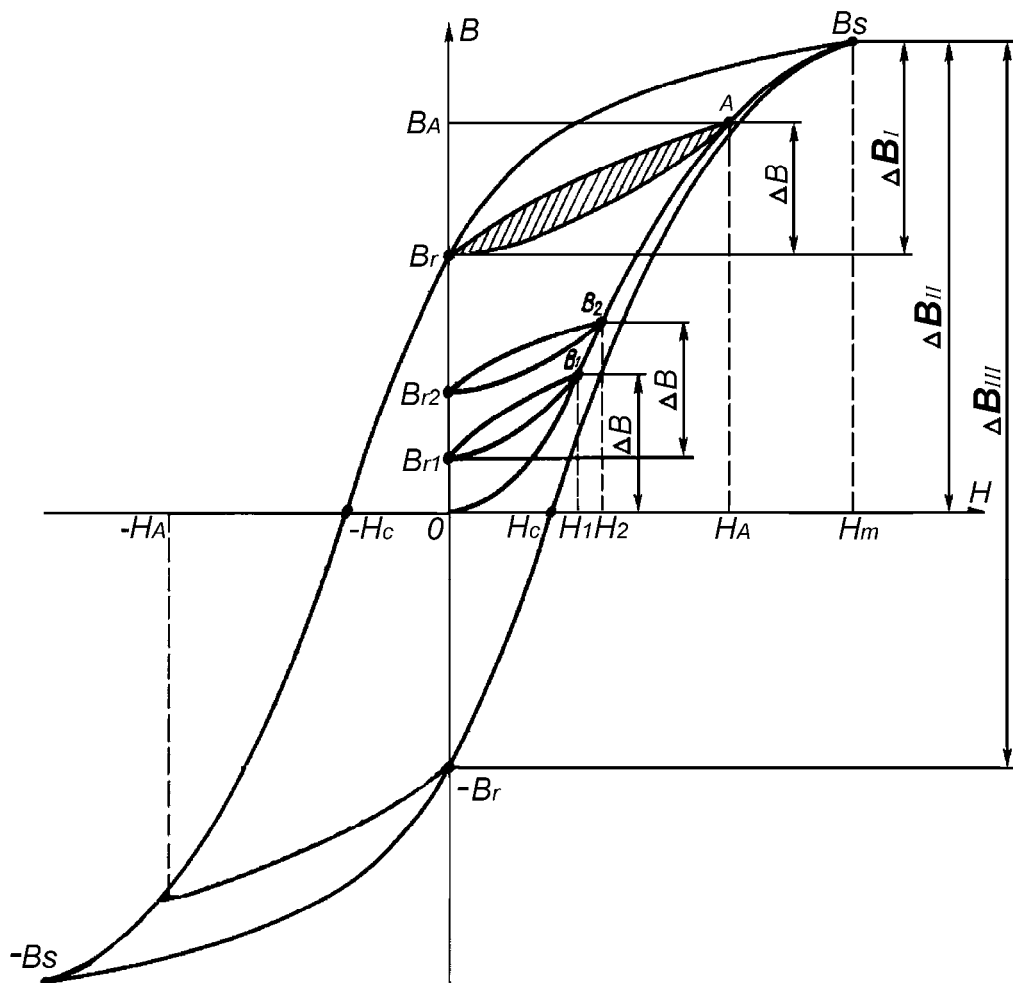


Рис. 3.1. Статический гистерезисный цикл намагничивания МС СЭМИС

В рассматриваемом процессе характерным является то обстоятельство, что величина остаточной индукции с каждым импульсом возрастает и каждый раз во время действия очередного импульса индукция увеличивается от уровня остаточной на величину $\Delta B = \text{const}$. Изменение импульсной магнитной проницаемости происходит до тех пор, пока остаточная магнитная индукция не станет равной некоторой предельной B_r . Более подробно процесс перехода МС к установившемуся циклу из исходного размагниченного состояния рассмотрен в [64].

Запишем формулу (3.5) для абсолютной магнитной средней проницаемости на частном цикле:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} . \quad (3.8)$$

Из формулы (3.8) следует, что средняя проницаемость зависит от значений приращения напряженности ΔH и приращения магнитной индукции

ΔB , причем ΔB зависит от предыстории намагничивания, то есть от того, в каком магнитном состоянии находилась МС к моменту появления намагничивающего импульса.

Определим среднюю импульсную магнитную проницаемость и сравним приращения магнитной индукции для получения магнитного поля с магнитной индукцией насыщения B_S при трех различных состояниях МС ЛЭМД (рис. 3.1):

- МС намагничена, точка, характеризующая магнитное состояние стали, до момента действия импульса определялась координатами $(0; B_r)$; индукция изменяется в пределах от B_r до B_S при изменении напряженности магнитного поля от нуля до H_m

$$\mu_{\Delta I} = \frac{\Delta B_I}{\Delta H} = \frac{B_S - B_r}{H_m}; \quad (3.9)$$

- МС размагничена, состояние до момента действия импульса определялось координатами $(H=0; B=0)$; индукция изменяется в пределах от нуля до B_S при изменении напряженности от нуля до H_m

$$\mu_{\Delta II} = \frac{\Delta B_{II}}{\Delta H} = \frac{B_S}{H_m}; \quad (3.10)$$

- МС намагничена, состояние до момента действия импульса определялось координатами $(0; -B_r)$; индукция изменяется в пределах от $-B_r$ до B_S при изменении напряженности от нуля до H_m

$$\mu_{\Delta III} = \frac{\Delta B_{III}}{\Delta H} = \frac{B_S + B_r}{H_m}. \quad (3.11)$$

Импульсные проницаемости и приращения магнитных индукций на частных гистерезисных циклах для рассмотренных случаев с учетом (3.8) между собой соотносятся:

$$\mu_{\Delta III} > \mu_{\Delta II} > \mu_{\Delta I}; \quad \Delta B_{III} > \Delta B_{II} > \Delta B_I. \quad (3.12)$$

Из соотношений (3.9-3.11) следует, что значения приращения индукции при изменении напряженности магнитного поля от нуля до H_m тем меньше, чем выше начальное значение индукции в якоре ЛЭМД, наибольшей величиной которой является остаточная индукция предельного цикла B_r .

Обычно в ЛЭМД детали магнитной системы выполняются по технологическим и конструктивным соображениям из массивной стальнойковки (Ст10, Ст20). Массивный якорь имеет большое преимущество перед шихтованным в технологичности изготовления и прочности, в результате чего в СЭМИС достигается удельная энергия удара до 10 Дж/кг. Однако применение массивной МС приводит к дополнительному увеличению потерь на вихревые токи по сравнению с шихтованной МС. Поэтому в реальных условиях магнитная проницаемость будет еще меньше значения μ_Δ , определяемого формулой (3.8). Объясняется это размагничивающим действием воздушного зазора и вихревых токов. Учет это введением кажущейся магнитной

проницаемости μ_k , при этом соотношения (3.12) не изменятся. Магнитный поток во вторичном короткозамкнутом контуре МС ЛЭМД за время импульса t_u индуцирует ЭДС e_k :

$$e_k = -w_k \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_k \cdot \mu_k \cdot S \cdot \frac{dH_0}{dt} \cos \beta, \quad (3.13)$$

ЭДС e_k в приращениях:
$$e_k \approx -w_k \cdot S \frac{\Delta B}{\Delta t} = -w_k \cdot S \frac{\Delta B}{t_u}, \quad (3.13^*)$$

где w_k – приведенное число витков вторичного контура МС, β – угол между осью МС и вектором напряженности магнитного поля. Будем вначале полагать, что ЭДС наводится лишь основным магнитным потоком Φ_0 , проходящим через активную площадь МС S . Под действием этой ЭДС в короткозамкнутом контуре появляется ток $i_k = e_k/r_k$, где r_k – приведенное активное сопротивление вторичного контура.

Вследствие сложности определения и разграничения потерь в МС оценим потери приближенно.

Потери мощности на гистерезис [64]:

$$P_\Gamma = \frac{V}{t_u} \int H \cdot dB \approx \frac{V}{t_u} \Delta H \cdot \Delta B, \quad (3.14)$$

где V – объем МС.

Потери мощности на вихревые токи с учетом (3.13, 3.13*):

$$P_B = \int d \left(\frac{e_k^2}{r_k} \right) \approx \xi \frac{\Delta B^2 \cdot S^2}{r_k \cdot t_u^2}, \quad (3.15)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от геометрической формы и размеров поперечного сечения якоря.

С учетом (3.14), (3.15) запишем для суммарных потерь мощности в МС:

$$P_\Sigma = P_B + P_\Gamma + P_{\text{дон}} \approx \frac{V}{t_u} \Delta H \cdot \Delta B + \xi \frac{\Delta B^2 \cdot S^2}{r_k \cdot t_u^2} + P_{\text{дон}}, \quad (3.16)$$

где $P_{\text{дон}}$ – дополнительные потери, включающие потери на магнитную вязкость и другие потери, не учитываемые аналитическим путем.

Из выражения (3.16) следует, что потери в стали прямо пропорциональны приращению магнитной индукции. Учитывая соотношение (3.12), запишем:

$$P_{\Sigma III} > P_{\Sigma II} > P_{\Sigma I}, \quad (3.17)$$

т.е. из рассмотренных выше трех магнитных состояний минимальные потери мощности в МС при работе ЛЭМД будут для первого случая, когда остаточная магнитная индукция B_r униполярна по отношению к намагничивающим импульсам. Следовательно, для первого случая за время действия импульса t_u

больше энергии заряда E_c ЕНЭ перейдет в полезную энергию удара E_y , коэффициент эффективности энергопреобразования $\eta = E_y/E_c$ будет выше. С учетом (3.17) запишем для трех магнитных состояний:

$$E_{y(I)} > E_{y(II)} > E_{y(III)}; \quad \eta_I > \eta_{II} > \eta_{III}. \quad (3.18)$$

Таким образом, приведенный анализ энергопреобразования в ЛЭМД показывает, что в зависимости от предыстории намагничивания МС ЛЭМД энергия удара и КПД будут максимальны при подаче униполярного импульса по отношению к намагниченному состоянию МС, причем выше значение остаточной магнитной индукции B_r , тем больше энергия удара и КПД.

3.2. Экспериментальные исследования энергетических показателей ЛЭМД при различных состояниях МС

Для проверки влияния предыстории намагничивания МС на энергетические показатели СЭМИС (E_y и η) проведено экспериментальное исследование ЛЭМД при питании от ЕНЭ для рассмотренных выше трех состояний МС – $\{I (B_r > 0), II (B_r = 0), III (B_r < 0)\}$.

Основные параметры исследуемого ЛЭМД с комбинированным якорем и стопом [7]: диаметр якоря $d_{я} = 31$ мм, магнитная система выполнена из конструкционной углеродистой стали Ст20. Данные заряда ЕНЭ и результаты экспериментов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Влияние предыстории намагничивания на энергию удара и КПД в СЭМИС

	Состояние МС	E_y , Дж	η , %	$k^{1)}$
1) $C=6,4$ мФ $U=50$ В $E_c=8$ Дж	$I (B_r > 0)$	2,43	30,4	1
	$II (B_r = 0)$	1,9	23,8	0,78
	$III (B_r < 0)$	1,4	17,5	0,57
2) $C=1,12$ мФ $U=150$ В $E_c=12,6$ Дж	$I (B_r > 0)$	1,78	14,1	1
	$II (B_r = 0)$	1,4	11,1	0,79
	$III (B_r < 0)$	1,1	8,7	0,62
3) $C=1,12$ мФ $U=250$ В $E_c=35$ Дж	$I (B_r > 0)$	5,3	15,1	1
	$II (B_r = 0)$	4,5	12,9	0,85
	$III (B_r < 0)$	3,5	10	0,66
4) $C=2,2$ мФ $U=200$ В $E_c=44$ Дж	$I (B_r > 0)$	6,5	14,8	1
	$II (B_r = 0)$	4,9	11,14	0,75
	$III (B_r < 0)$	4,0	9,1	0,61

Примечание: ¹⁾ $k = E_y/E_{y(I)}$ – показатель, характеризующий отношение энергий удара для данного магнитного состояния к намагниченному состоянию $I (B_r > 0)$ при питании от ЕНЭ с одинаковыми параметрами заряда C и U .

Из полученных экспериментальных данных следует, что энергия удара E_u и эффективность энергопреобразования η при питании от ЕНЭ с фиксированными параметрами для первоначально намагниченного состояния I ($B_r > 0$) больше, чем при питании для размагниченого состояния II ($B_r = 0$), тем более, когда первоначальное состояние МС намагничено противоположно направлению поля намагничивающего импульса III ($B_r < 0$). Следует отметить, что в рассматриваемых режимах при питании от ЕНЭ соблюдалась апериодическая форма разряда, но при импульсном питании от ЕНЭ могут возникнуть колебания тока в цепи, в результате чего ток в обратном направлении может достигнуть величины, достаточной для размагничивания МС, а следовательно, привести к понижению E_u и η .

Анализ экспериментальных данных показывает, что в зависимости от предыстории намагничивания МС ЛЭМД величина энергии удара E_u изменяется в достаточно широких пределах, следовательно, меняется показатель эффективности энергопреобразования СЭМИС η . Запишем пределы изменений параметров энергии удара в рассматриваемых магнитных состояниях по отношению к энергии удара в намагниченном состоянии на установившемся частном гистерезисном цикле $E_{u(I)}$:

$$E_{u(II)} = (0,75 - 0,85) \cdot E_{u(I)} - \text{для размагниченого состояния МС II } (B_r = 0);$$

$$E_{u(III)} = (0,55 - 0,65) \cdot E_{u(I)} - \text{для намагниченого состояния МС III } (B_r < 0).$$

Очевидно, что пренебрегать таким разбросом выходных параметров СЭМИС в УМК, использующих дозированную энергию удара, нельзя.

3.3. Способ повышения стабильности энергии удара в СЭМИС

Ответы на вопросы, от каких параметров зависят стабильность энергии удара, КПД СЭМИС и по каким закономерностям происходит энергопреобразование в ЛЭМД при питании от ЕНЭ, являются принципиальными, так как это позволит разработчикам повысить стабильность энергии удара и эффективность энергопреобразования СЭМИС.

Стабильность выходных параметров в технологических процессах маркирования и клеймения, требующих точного дозирования энергии воздействия, является определяющим показателем. На стабильность качественных показателей технологических процессов маркирования и клеймения с точным дозированием энергии воздействия непосредственно влияет стабильность режимных параметров процесса разряда и стабильность параметров заряда емкостного накопителя. Разработка и практическая реализация способов их стабилизации и регулирования являются важной научно-практической задачей. Задача усложняется большим количеством и взаимным влиянием факторов рабочего процесса, которые носят нелинейный характер. При этом нелинейность определяет качественную и количественную картину явлений, а не служит малой поправкой к линейному описанию.

Как в случае использования квазистатического метода маркирования, так и в случае применения ударного метода важно обеспечить стабильность силовых и энергетических выходных параметров СЭМИС.

В общем случае зависимость выходных параметров от основных дестабилизирующих факторов в СЭМИС может быть представлена в виде:

$$\frac{X_i}{\bar{X}_i} = \varphi(U_p, C, T, K_\Gamma, K_{np}, K_B, K_{ct}, \dots), \quad (3.19)$$

где \bar{X}_i, X_i – среднее и текущее значение выходного параметра;

U_p – напряжение заряда, характеризующее рабочий режим СЭМИС;

C – емкость ЕНЭ; T – влияние температуры; K_Γ – коэффициент, учитывающий изменение выходных параметров в зависимости от гистерезисного характера свойств активных ферромагнитных частей в СЭМИС;

K_{np}, K_B, K_{ct} – коэффициенты, учитывающие производственный разброс физико-механических свойств материалов и их изменения при воздействии повышенной влажности, старения.

Введем показатель, характеризующий нестабильность энергии удара:

$$\delta_{Ey} = \frac{\Delta E_y}{E_{y(I)}} \cdot 100\%, \quad (3.20)$$

где $\Delta E_y = E_{y(I)} - E_{y(n)}$ – диапазон изменения энергии удара при соответствующем магнитном состоянии МС по сравнению с энергией удара при установившемся состоянии МС $E_{y(I)}$.

Как показали исследования [4, 5], стабилизация только зарядного напряжения ЕНЭ не обеспечивает требуемую стабилизацию энергетических параметров, а отсюда – воспроизводимость параметров силовых импульсов. Из параграфа 3.1 следует, что практическое использование СЭМИС в операциях маркирования и клеймения без учета предыстории намагничивания МС ЛЭМД накладывает определенные ограничения на качество маркировки и клейма из-за критерия нестабильности параметров энергии удара. Определенный по формуле (3.20) показатель нестабильности энергии удара для размагниченного магнитного состояния $II(B_r=0)$ по отношению к намагниченному установившемуся состоянию $I(B_r>0)$ при питании от ЕНЭ с фиксированными параметрами заряда C и U (данные табл. 3.1) в среднем составляет:

$$\delta_{Ey(II)} = (\Delta E_{y(II)} / E_{y(I)}) \cdot 100\% = 15-25\%.$$

Аналогично для противоположно намагниченного состояния $III(B_r<0)$ по отношению к состоянию $I(B_r>0)$ нестабильность энергии удара составляет:

$$\delta_{E_{y(III)}} = (\Delta E_{y(III)} / E_{y(I)}) \cdot 100\% = 35-45\%.$$

Очевидно, что такой разброс выходных параметров энергии удара СЭМИС в УМК, использующих дозированную энергию удара, недопустим.

Какова же будет нестабильность энергетических параметров при питании униполярными импульсами? Из предыдущего параграфа следует, что при питании униполярными импульсами СЭМИС энергия удара и КПД повышаются. Из анализа физического процесса намагничивания при питании ЛЭМД однополярными импульсами следует, что после того, когда МС перейдет в установившееся магнитное состояние, выходные энергетические параметры должны стабилизироваться, так как остаточная магнитная индукция достигнет предельного значения. С учетом (3.8) средняя импульсная магнитная проницаемость будет определяться для установившегося частного гистерезисного цикла (AB_r):

$$\mu_{\Delta A} = \frac{B_A - B_r}{H_A}, \quad (3.21)$$

где B_A – магнитная индукция, соответствующая текущему значению напряженности магнитного поля H_A (рис. 3.1).

Для определения параметра нестабильности энергетических показателей СЭМИС с установившимся намагниченным состоянием МС при питании от ЕНЭ проведены экспериментальные исследования.

Таблица 3.2

Установление стабильности энергии удара и повышение энергетических показателей при питании униполярными импульсами от ЕНЭ

№ импульса	1	2	3	4	5	6
E_y , Дж	4,92	5,93	6,41	6,50	6,52	6,50
η , %	11,18	13,48	14,57	14,77	14,82	14,77
δ_{E_y} , %	24,3	8,77	1,38	-	0,3	-
Значение остаточной магнитной индукции	Размагниченное состояние $B_r = 0$	Промежуточные намагниченные состояния $0 < B_r < B_{r(max)}$		Установившееся намагниченное состояние $B_r = B_{r(max)}$		

В качестве примера в табл. 3.2 приведены данные процесса установления стабилизации энергии удара при первоначально размагниченной МС ЛЭМД (параметры ЛЭМД как и в параграфе 3.1) и при питании от ЕНЭ с фиксируемыми параметрами: емкости $C=2,2$ мФ, напряжения заряда $U=200$ В. Для повышения точности измерения энергия удара определялась согласно методике [17].

Анализ данных табл. 3.2 показывает, что с четвертого импульса МС переходит в установившееся намагниченное состояние с некоторым предельным значением остаточной магнитной индукции $B_{r(max)}$ для данного намагничивающего импульса, сопровождаемое стабилизацией и незначительным разбросом энергии удара E_u . Нестабильность с установившимся намагниченным состоянием МС при максимальной для данной СЭМИС остаточной магнитной индукции $B_r = B_{r(max)}$ составляет не более 0,3%. Стабильность энергетических параметров после многократного намагничивания униполярными импульсами обусловлена стабилизацией средней проницаемости в верхнем слое намагниченной МС.

Аналогичные результаты установления стабильности энергии удара были получены после исследования других типов СЭМИС различных габаритных размеров (в частности для ЛЭМД продольно-поперечного поля). Экспериментально установлено, что энергия удара стабилизируется после подачи на обмотку ЛЭМД последовательных двух-четырех однополярных импульсов. Необходимое количество однополярных импульсов (два, три, четыре...) зависит от энергии заряда накопителя и, следовательно, от амплитудного значения импульса тока апериодической формы разряда.

Экспериментальные исследования подтверждают теоретические выводы о влиянии предыстории намагничивания на стабильность энергетических показателей ЛЭМД и установление стабилизации при питании однополярными импульсами. Показано, что пренебрежение предысторией магнитного состояния МС ЛЭМД недопустимо в устройствах маркирования и клеймения, использующих дозированную энергию удара. Влияние предыстории намагничивания должно учитываться при разработке новых методов расчета и моделировании динамических режимов ЛЭМД с массивной МС.

Следует отметить, что у МС, находящейся в намагниченном магнитном состоянии, после перерыва в функционировании ЛЭМД в течение 5-10 часов магнитные свойства «частично размагничиваются» (то есть уменьшается значение остаточной магнитной индукции), поэтому необходимо перед работой СЭМИС, используемого в качестве привода в УМК с дозированной энергией удара, производить предварительное намагничивание МС ЛЭМД питающими импульсами.

Среди других факторов, приведенных в зависимости (3.19) и существенно влияющих на стабильность энергетических показателей СЭМИС, следует выделить напряжение заряда, емкость конденсатора и температуру.

Существенным фактором, оказывающим влияние на стабилизацию энергии удара в СЭМИС, является напряжение. Поэтому должны выдвигаться требования к стабилизации напряжения заряда, то есть необходимо применять схемы со стабилизацией энергии заряда ЕНЭ.

Нестабильность напряжения заряда определяется по формуле:

$$\delta_{Um} = \frac{\Delta U}{\bar{U}_0} \cdot 100\% , \quad (3.22)$$

где ΔU – диапазон девиации напряжения, а \bar{U}_0 – среднее значение напряжения заряда. Например, при исследовании схемы питания (рис. 2.10, б) получены следующие результаты. Ввиду того, что заряд конденсаторов происходит в течение длительного времени (за 20–70 периодов напряжения электросети), удается стабилизировать напряжение заряда U_0 батареи конденсаторов с большей точностью, чем в устройствах с непосредственным питанием от электросети. В предлагаемых схемах заряда УМК системы управления поддерживают U_0 в пределах 0,99–1,01 заданного значения, при этом в применяемой схеме зарядного устройства, представленной на рис. 2.10, б, нестабильность напряжения на емкости после окончания зарядки по формуле (3.22) не превышает $\delta_{Um}=1,0\%$ при колебаниях напряжения электросети в пределах 0,85–1,10 номинального значения. При этом нестабильность энергии удара ЛЭМД составляет $\delta_{E_{y(I)}}=(\Delta E_y/E_{y(I)}) \cdot 100\%=0,3-0,4\%$, что значительно меньше по сравнению с отклонением значений E_y при разбросе магнитных параметров без учета влияния предыстории намагничивания.

В результате стабилизации напряжения заряда при установившемся намагниченном состоянии МС ($B_r = B_{r(max)}$) обеспечивается высокая стабильность импульсов тока в ЛЭМП УМК, а следовательно, и энергия воздействия при маркировании. Стабильность импульсов тока несколько ниже стабильности U_0 , но в большинстве случаев отклонение тока не превышает $\delta_{Im} = 0,6\%$ среднего значения при данной настройке схемы УМК. В итоге при функционировании СЭМИС в УМК обеспечивается высокая стабильность выходных энергетических параметров.

Другим фактором, влияющим на нестабильность выходных параметров в СЭМИС, является отклонение значения емкости накопительных конденсаторов от заданного. Так, следует учитывать изменение емкости накопителя при длительной эксплуатации, особенно в случае применения электролитических конденсаторов (§ 4.2).

Другим фактором, который может влиять на нестабильность выходных параметров в СЭМИС, является температура. С увеличением температуры удельные электрические сопротивления провода обмоток (меди) и магнитной системы (стали) изменяются, вследствие чего меняются электрические параметры (как активные, так и индуктивные) схемы замещения СЭМИС, а по мере нагрева растут и потери в обмотках. При использовании в кратковременном режиме и повторно-кратковременном режиме работы СЭМИС в УМК с невысокой скважностью импульсов данный фактор можно не учитывать, так как в этих режимах температура активных частей восстанавливается до тех же значений перед подачей последующего импульса.

Таким образом, реализация регулирования и стабилизации параметров разрядных импульсов в СЭМИС возможна либо путем изменения структуры

формирователя разрядных импульсов в момент их протекания, либо путем регулирования начальных условий разряда, либо, как это следует из данного параграфа, путем достижения и поддержания установившегося намагниченного состояния МС (последнее проще в реализации).

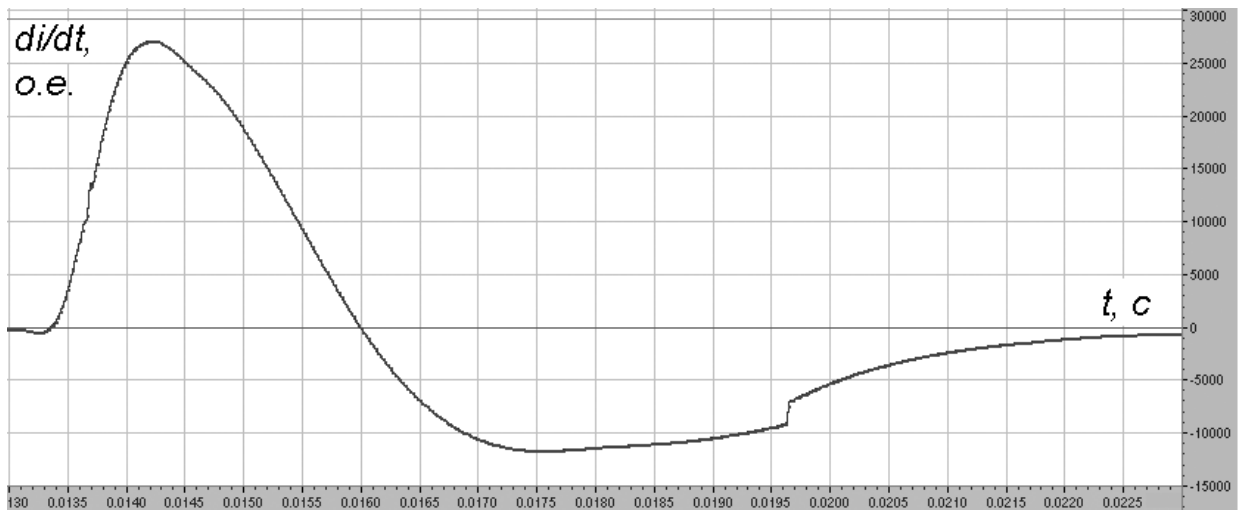
Следует отметить, что задача обеспечения стабильности выходных параметров СЭМИС в большой степени зависит от заданных допусков нестабильности и наличия дестабилизирующих воздействий.

3.4. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в СЭМИС

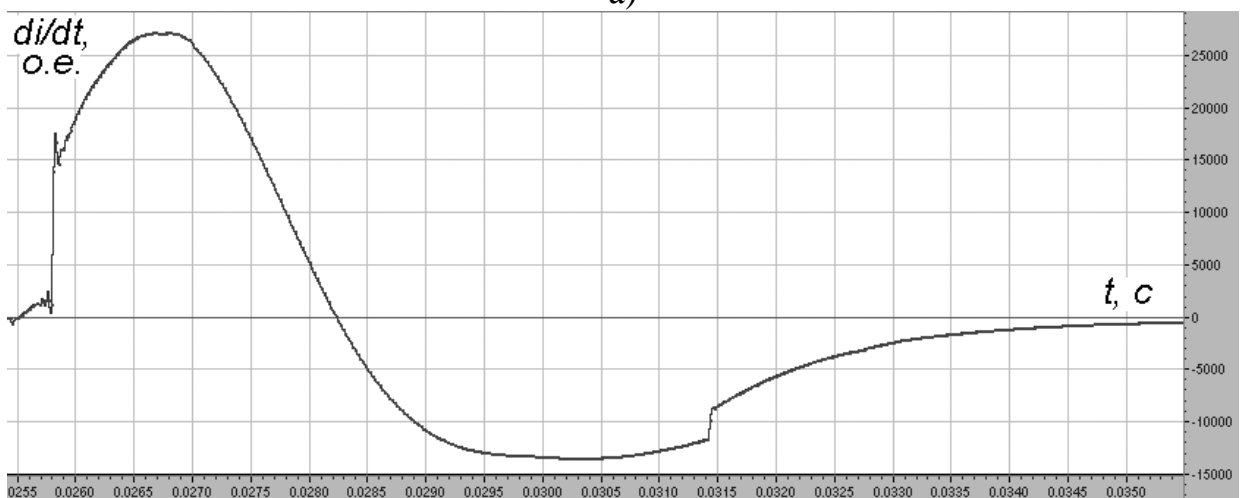
В рамках дальнейшего развития способа стабилизации энергии удара в СЭМИС для технологий маркирования и клеймения с точным дозированием энергии воздействия [74-76] исследовалось влияние процессов предыстории намагничивания МС ЛЭМД в направлении снижения нестабильности его энергетических показателей (энергии удара E_y и КПД).

Как показали исследования [74, 76], стабилизация только напряжения заряда ЕНЭ не обеспечивает требуемую стабилизацию энергетических параметров, а следовательно, и воспроизводимость параметров силовых импульсов. Достижение стабильности наряду с повышением энергетических показателей осуществляется при установившемся намагниченном состоянии МС ЛЭМД, которое можно получить после подачи последовательных 2-4 однополярных импульсов.

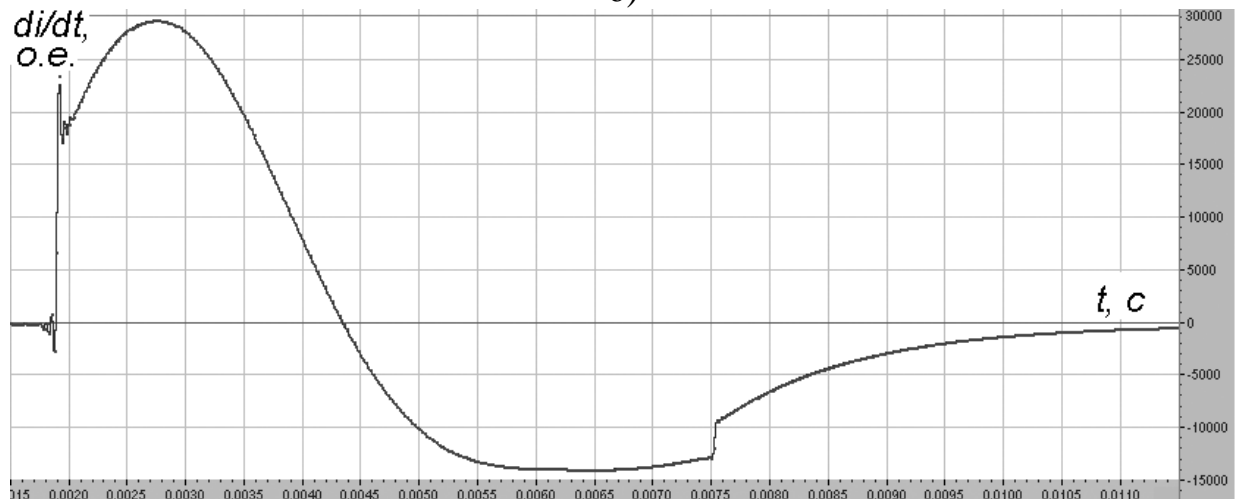
С этой целью были проведены экспериментальные исследования установления стабилизации разрядных импульсов в СЭМИС из начального размагниченного состояния МС ($B_r=0$) при питании от ЕНЭ с различными параметрами заряда [104]. На рис. 3.3 рассмотрены режимы разряда конденсатора емкостью $C = 6,4$ мФ с напряжением заряда $U = 60$ В, в экспериментах соблюдалась апериодическая форма разряда. Из рассмотрения осциллограмм скоростей нарастания тока $di/dt=f(t)$ виден момент удара якоря, по которому легко определяется время срабатывания ЛЭМД. Так время срабатывания уменьшается при переходе из состояния размагниченное – промежуточное – установившееся намагниченное состояние МС и, соответственно, составляет 6,3: 5,65: 5,6 мс.



а)



б)



в)

Рис. 3.3. Осциллограммы скоростей нарастания тока в ЛЭМД при подаче импульса от ЕНЭ емкостью $C = 6,4$ мФ, напряжением заряда $U = 60$ В: а) размагниченное состояние МС ($Br=0$); б) промежуточное намагниченное состояние МС ($Br>0$); в) установившееся намагниченное состояние МС ($Br = Br_{(max)} >0$)

Результаты экспериментальных исследований зависимостей производной тока di/dt в ЛЭМД на примере установившегося и размагниченного состояний МС показывают различие по амплитуде, форме и длительности импульсов. Сравним параметры разрядных импульсов при подаче на обмотку возбуждения ЛЭМД (рис. 3.3) для выявления характерных параметров стабилизации и отыскания путей увеличения стабильности энергетических параметров.

Из анализа осциллограмм (рис. 3.3) также следует, что при переходе от размагниченного состояния к установившемуся намагниченному состоянию (предельные случаи магнитных состояний МС) скорость установления тока в обмотке ЛЭМД увеличивается. Объяснением этому служит, по-видимому, различие в значениях противодействующего поля вихревых токов из-за различной импульсной магнитной проницаемости.

Сравним отдельно две осциллограммы для размагниченного состояния МС ($B_r=0$) и установившегося намагниченного состояния МС ($B_r > 0$) (рис. 3.4).

Импульс разряда на обмотку возбуждения ЛЭМД аналитически можно представить разностью двух экспоненциальных функций, то есть он является импульсом двухэкспоненциального вида и описывается выражением:

$$i(t) = \frac{1}{k_m} A \cdot (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (3.23)$$

где A – амплитуда импульса; β_1, β_2 – показатели степени экспонент, определяющие падающую часть (срез) и восходящую часть (фронт) импульса соответственно.

Продифференцировав выражение (3.5) по времени

$$\frac{di}{dt} = \frac{A}{k_m} \cdot [\beta_2 \cdot \exp(-\beta_2 \cdot t) - \beta_1 \cdot \exp(-\beta_1 \cdot t)], \quad (3.24)$$

получим из условия $\frac{di}{dt} = 0$ момент времени

$$t_m = \frac{\ln\left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)}{\beta_1 - \beta_2}, \quad (3.25)$$

в котором функция достигает максимума. $a(t) = \frac{1}{k_m} A$

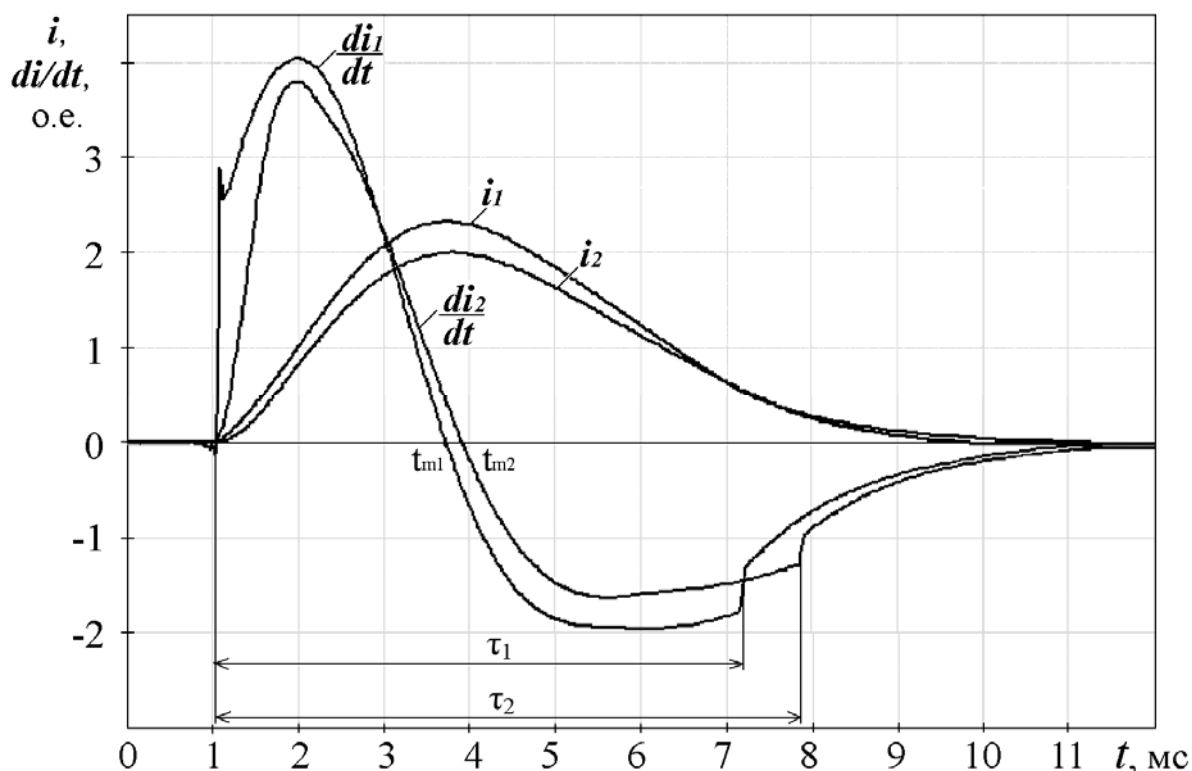


Рис. 3.4. Осциллограммы токов и их производных для импульсов в ЛЭМД от времени при питании от ЕНЭ с одинаковыми параметрами заряда: $i_1, di_1/dt$ – МС намагничена ($B_r = B_{r(max)} > 0$); $i_2, di_2/dt$ – МС размагничена ($B_r = 0$)

Из рис. 3.4 следует, что при подаче импульса от ЕНЭ с одинаковой энергией заряда на обмотку ЛЭМД с намагниченной МС момент времени t_m наступает быстрее, чем при подаче импульса намагничивания на полностью размагниченную МС ($t_{m1} < t_{m2}$).

Максимальная крутизна импульса определяется из условия $\frac{d^2i}{dt^2} = 0$.

Вычисляя вторую производную от выражения (3.23), получим уравнение

$$\frac{d^2i}{dt^2} = \frac{A}{k_m} \cdot [\beta_1^2 \cdot \exp(-\beta_1 \cdot t) - \beta_2^2 \cdot \exp(-\beta_2 \cdot t)], \quad (3.26)$$

из (3.26) определим момент времени, соответствующий условию $\frac{d^2i}{dt^2} = 0$:

$$t_k = \frac{-\ln\left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2^2}\right)}{\beta_2 - \beta_1}. \quad (3.27)$$

Сравнивая моменты времени t_k рассматриваемых импульсов, получаем

момент времени, отвечающий за максимальную крутизну фронта импульса, для намагниченного состояния меньше по сравнению с размагниченным состоянием ($t_{k1} < t_{k2}$). Как показывают проведенные экспериментальные исследования, промежуточным магнитным состояниям соответствуют значения моментов времени t_m и t_k между крайними значениями для размагниченного и намагниченного состояний.

Существующие отличия в параметрах сравниваемых разрядных импульсов в процессе установления стабилизации приводят к следующим выводам [76]:

1. Амплитуда импульса i_1 больше амплитуды импульса i_2 при одинаковой длительности импульсов, следовательно, и энергия удара будет больше, так как энергия, запасенная в магнитной системе, с учетом остаточного магнетизма прямо пропорциональна значению тока.

2. Момент времени нарастания максимума тока наступает быстрее у импульса с намагниченной МС по сравнению с размагниченной МС, то есть для импульса со стабильными значениями энергетических параметров характерно более быстрое установление максимума тока ($t_{m1} < t_{m2}$).

3. Как следует из осциллограммы di/dt (рис. 3.4), у разрядного импульса на намагниченную МС время срабатывания СЭМИС меньше по сравнению с импульсом, когда МС размагничена ($\tau_1 < \tau_2$).

4. В процессе установления стабилизации параметров разрядных импульсов осуществляется увеличение крутизны фронта импульса; так крутизна фронта импульса тока при питании из намагниченного состояния 1 больше, чем для размагниченного состояния 2 ($t_{k1} < t_{k2}$). Это может послужить доказательством того, что импульсу тока с более крутым фронтом (меньшим коэффициентом формы) при прочих одинаковых параметрах соответствует большая энергия удара.

При исследовании установления стабильности энергетических параметров экспериментальной модели СЭМИС с аperiodическим характером процесса разряда определялось влияние различных соотношений между конструктивными параметрами ЛЭМД и параметрами заряда ЕНЭ, причем для всех опытов суть приведенных выводов подтверждалась.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СЭМИС УМК

4.1. Определение оптимальных режимов энергопреобразования СЭМИС

Интерес к исследованию энергетических показателей ЛЭМД при питании от ЕНЭ обусловлен потребностью в создании привода для операций маркирования и клеймения, экономичного в части энергопотребления, с улучшенными массогабаритными характеристиками и уменьшенной установленной мощностью источника питания, а также выполнением технологических операций с точным дозированием энергии удара инструментальной бойкой на обрабатываемую среду в широких пределах.

Для установки требуемой величины энергии удара подбираются параметры ЕНЭ: емкость и напряжение заряда конденсатора. Рассматриваемый электропривод должен обеспечивать высокую эффективность энергопреобразования при наименьших массогабаритных показателях как самого двигателя, так и накопителя.

Известно [7], что подбором соответствующих регулируемых параметров ЛЭМП (жесткости рабочей пружины, величины рабочего воздушного зазора и других) можно достичь оптимальных режимов работы привода и повысить его энергетические характеристики. При питании ЛЭМД от ЕНЭ следует учитывать параметры конденсаторной батареи. В настоящее время конденсаторное питание применяется преимущественно для линейных индукционно-динамических двигателей [93], питание ЛЭМД от емкостного накопителя энергии изучено меньше [94]. Возникает необходимость в экспериментальном изучении энергетических характеристик ЛЭМД при питании от ЕНЭ.

Объектом исследования является импульсный ЛЭМД броневое типа с укороченной магнитной системой, комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами.

При создании исследуемого ЛЭМД выдержаны в соответствии с работой [4] оптимальные соотношения для основных геометрических размеров: длины обмотки возбуждения к диаметру якоря $L/d_{\text{я}}=1$, диаметра якоря к внешнему диаметру $d_{\text{я}}/D=0,5$ при высоте стопа $h_c=0,3 \cdot L$. Основные параметры исследуемого ЛЭМД: диаметр якоря $d_{\text{я}}=31$ мм, обмотка возбуждения содержит 250 витков медного провода сечением 1 мм^2 . В качестве ЕНЭ используется батарея конденсаторов, составленная из емкостей 1,12; 2,2; 4,3; 6,4 мФ. Исходя из требований минимальных массогабаритных показателей были выбраны оксидно-электролитические импульсные конденсаторы серии К50-17 с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}=300$ В. В связи с большими допустимыми отклонениями по емкости электролитических конденсаторов (до 50%) при изготовлении и с выходом из строя отдельных конденсаторов при эксплуатации емкость определялась методом обсчета экспоненты разряда [102] на известное

сопротивление (§ 5.2). Порядок величин емкостей конденсаторов был выбран с учетом анализа имеющихся предварительных опытных данных.

Батарея конденсаторов предварительно заряжалась от сети через выпрямитель с токоограничивающим дросселем, обеспечивающим плавное нарастание заданного значения напряжения. Силовые импульсы тока создавались при разряде конденсаторов на обмотку ЛЭМД с использованием быстродействующего тиристора типа ТБИ 271-200. Максимальная скорость исполнительного элемента (якоря) определялась согласно вышеприведенной методике измерения энергии удара [96]. Эффективность электромеханической системы оценивается энергией удара и наибольшим КПД системы:

$$E_y = \frac{1}{2} m_{\text{я}} \cdot V_{\text{я}}^2, \quad (4.1)$$

$$\eta = m_{\text{я}} \cdot C^{-1} \cdot U_0^{-2} \cdot V_{\text{я}}^2 \cdot 100\% , \quad (4.2)$$

где $m_{\text{я}}$ – масса якоря, кг; $V_{\text{я}}$ – максимальная скорость якоря, м/с; C – емкость конденсатора, Ф; U_0 – напряжение заряда конденсатора, В. Погрешность проведенных измерений не превышала 5 %.

На рис. 4.1, 4.2 приведены экспериментальные зависимости энергии удара ЛЭМД от напряжения и от энергии заряда для выбранного ряда емкостей при величине воздушного зазора $\delta = 10$ мм и коэффициенте жесткости пружины $k=2200$ Н/м. При увеличении энергии удара оптимальное значение емкости конденсатора для максимальной эффективности энергопреобразования уменьшается (рис. 4.2).

Зависимость напряжения заряда U накопителя емкостью C для требуемой энергии удара E_y при фиксированном зазоре $\delta=10$ мм хорошо аппроксимируется следующей эмпирической зависимостью:

$$U = \frac{a + b \cdot E_y^2}{C} + k \cdot E_y, \quad (4.3)$$

где $a = 130$, $b = 3,08$, $k = 14,6$ – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров ЛЭМД. Зависимость следует считать справедливой для энергии удара $E_y > 0,5$ Дж.

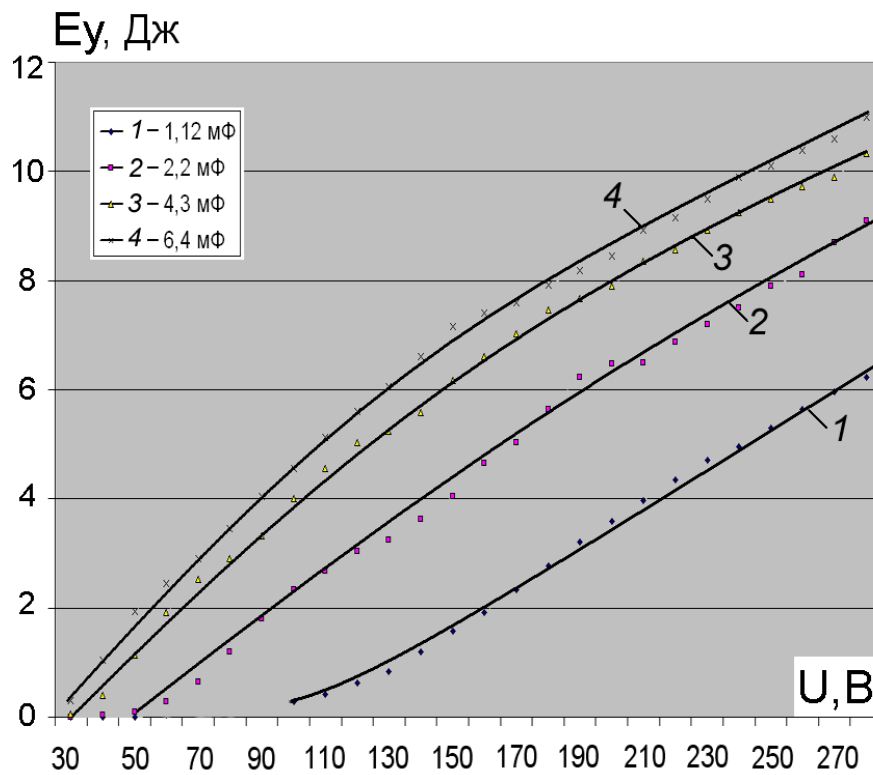


Рис. 4.1. Зависимости энергии удара от напряжения $E_y=f(U)$ при $\delta=10$ мм и $k=2200$ Н/м для ряда емкостей: 1 – 1,12 мФ, 2 – 2,2 мФ, 3 – 4,3 мФ, 4 – 6,4 мФ

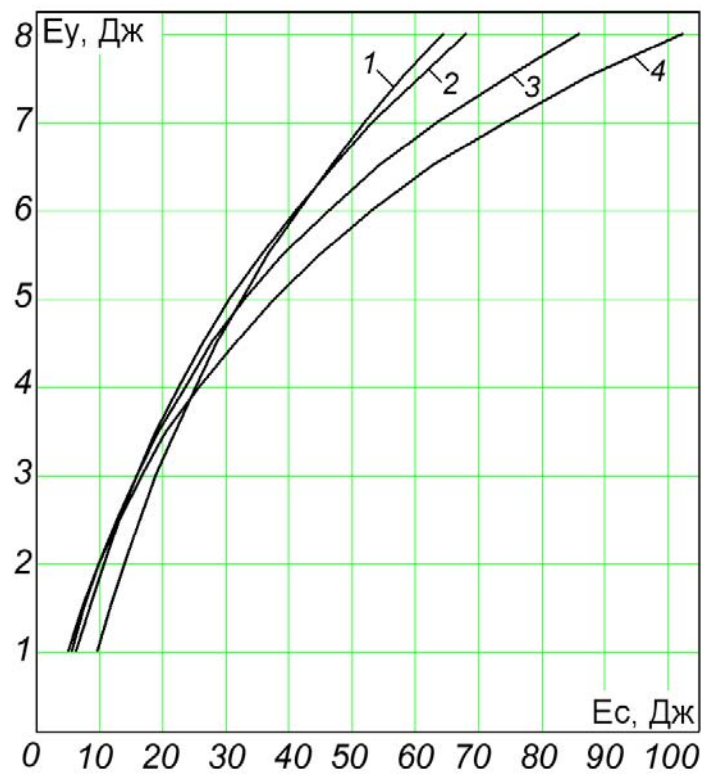


Рис.4.2. Зависимости энергии удара от энергии заряда $E_y=f(E_c)$ при $\delta=10$ мм и $k=2200$ Н/м для ряда емкостей: 1 – 1,12 мФ, 2 – 2,2 мФ, 3 – 4,3 мФ, 4 – 6,4 мФ

Зависимости КПД ЛЭМД от напряжения $\eta=f(U)$ и от энергии заряда $\eta=f(E_C)$ представлены на рис. 4.3. С увеличением напряжения заряда конденсаторов зависимость КПД имеет максимум для каждого фиксированного значения емкости при фиксированном рабочем воздушном зазоре $\delta=\text{const}$ и коэффициенте жесткости пружины $k=\text{const}$ (рис. 4.3, а).

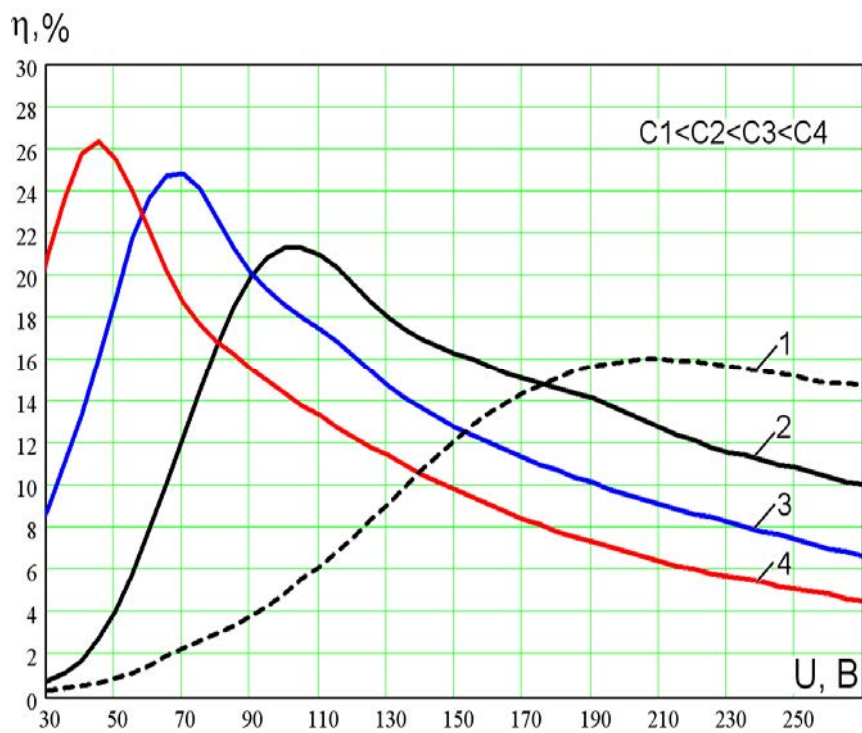
Представленные зависимости КПД снимались при $\delta=10$ мм и $k=2200$ Н/м. Так, для емкости $C_1=1,12$ мФ максимальный КПД, равный $\eta_1=16,1\%$, соответствует значению напряжения заряда $U_{\text{опт}1}=210$ В и энергии заряда $E_{c1}=24,7$ Дж; для емкости $C_2=2,2$ мФ, $U_{\text{опт}2}=102$ В, $E_{c\text{опт}2}=11,4$ Дж, $\eta_2=21,4\%$; для емкости $C_3=4,3$ мФ, $U_{\text{опт}3}=66$ В, $E_{c\text{опт}3}=9,4$ Дж, $\eta_3=24,9\%$ и для емкости $C_4=6,4$ мФ, $U_{\text{опт}4}=45$ В, $E_{c\text{опт}4}=11,4$ Дж, $\eta_4=26,4\%$.

При увеличении коэффициента жесткости пружины до $k=3700$ Н/м, максимумы значений КПД смещаются вправо по оси напряжения и составляют: $\eta_1=15,8\%$ ($U_1=228$ В, $C_1=1,12$ мФ); $\eta_2=20,2\%$ ($U_2=111$ В; $C_2=2,2$ мФ); $\eta_3=22,8\%$ ($U_3=72$ В, $C_3=4,3$ мФ); $\eta_4=24,6\%$ ($U_4=50$ В, $C_4=4,3$ мФ).

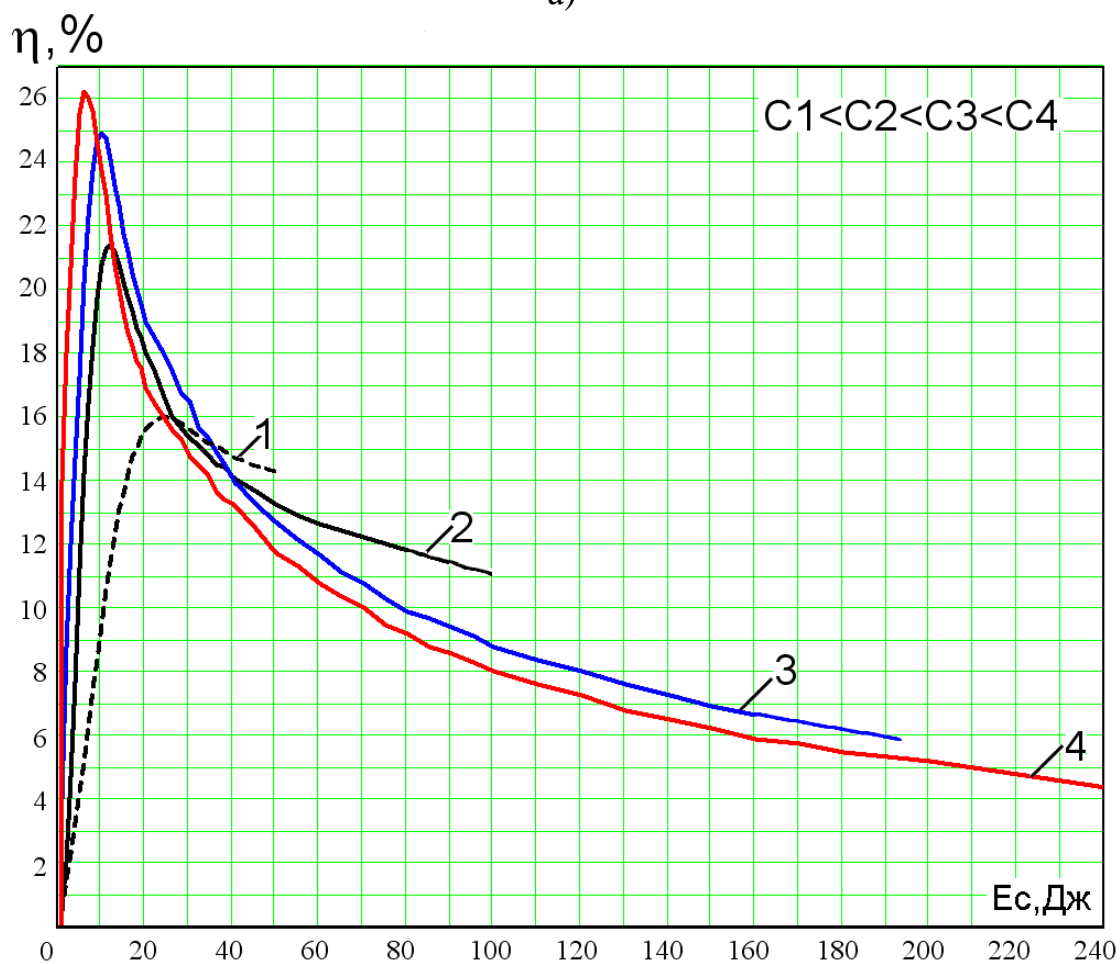
Проанализируем влияние параметров энергии заряда конденсаторной батареи на эффективность энергопреобразования на примере двух зависимостей $\eta_2=f(E_C)$ ($C_2=2,2$ мФ) и $\eta_3=f(E_C)$ ($C_3=4,3$ мФ). Как видно из рис. 4.3, б, в точках пересечения представленных зависимостей наблюдается равноэффективное энергопреобразование (одинаковый КПД) при $E_C = \text{const}$. Так, для зависимостей $\eta_2=f(E_C)$ и $\eta_3=f(E_C)$ в точке их пересечения $E_C=40$ Дж наблюдается равенство коэффициентов эффективности энергопреобразования, то есть $\eta_2=\eta_3=\eta=14,2\%$.

Из рис. 4.3, б следует, что при увеличении энергии заряда каждой емкости КПД с максимального значения снижается примерно по гиперболическому закону. При сравнении емкостей с одинаковой энергией заряда спад эффективности энергопреобразования после максимума обусловлен тем, что длительность разряда ЕНЭ становится больше времени срабатывания ЛЭМД.

На рис. 4.3, б пределы максимальной энергии заряда для емкостей ограничиваются техническим требованием по максимально допустимому напряжению заряда используемых конденсаторов.



a)



б)

Рис.4.3. Зависимости коэффициента полезного действия ЛЭМД от напряжения (а) и энергии заряда (б) при $\delta=10$ мм и $k=2200$ Н/м для ряда емкостей: 1- $C_1=1,12$ мФ, 2- $C_2=2,2$ мФ, 3- $C_3=4,3$ мФ, 4- $C_4=6,4$ мФ

На рис. 4.4, 4.5 приведены экспериментальные зависимости КПД ЛЭМД от емкости и напряжения заряда ЕНЭ при фиксированном воздушном зазоре $\delta=10$ мм. Исследовался [101, 105] ЛЭМД броневого типа с укороченной магнитной системой, комбинированным якорем, двумя рабочими воздушными зазорами $\delta = 10$ мм и коэффициентом жесткости противодействующей пружины $k = 2200$ Н/м для ряда емкостей: $C_1 = 1$, $C_2 = 2$, $C_3 = 4$, $C_4 = 6$, $C_5 = 8$ мФ при изменении напряжения на емкостном накопителе от 18 до 360 В. Для уменьшения количества экспериментов при восхождении к области оптимума максимальной эффективности энергопреобразования использовался метод планирования эксперимента [49]. Возможность плавного изменения амплитуды импульсов и ступенчатого регулирования емкости конденсатора при постоянстве энергии заряда облегчает выбор оптимального режима.

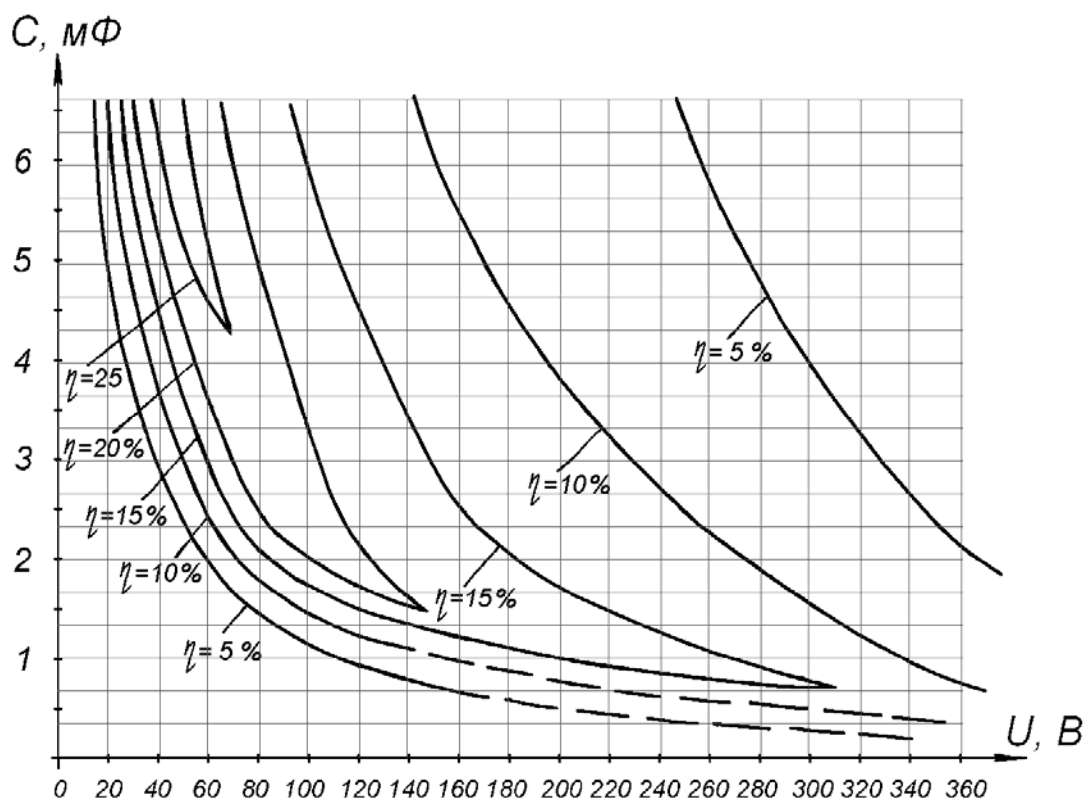


Рис. 4.4. Экспериментальные зависимости КПД ЛЭМД от емкости и от напряжения ЕНЭ при фиксированном рабочем воздушном зазоре $\delta = 10$ мм

На рис. 4.6 показаны характеристики энергии удара ЛЭМД от величины воздушного зазора, питаемого от емкостного накопителя для трех фиксированных значений емкостей ($C_1 = 3,2$ мФ; $C_2 = 4,8$ мФ; $C_3 = 6,4$ мФ) при постоянном коэффициенте жесткости пружины $k = \text{const}$ и одинаковом напряжении $U = \text{const}$. Как следует из зависимостей, для каждого значения энергии заряда емкостного накопителя существует оптимум максимальной эффективности энергопреобразования при соответствующем значении величины воздушного зазора, причем значение оптимальной емкости уменьшается при уменьшении воздушного зазора.

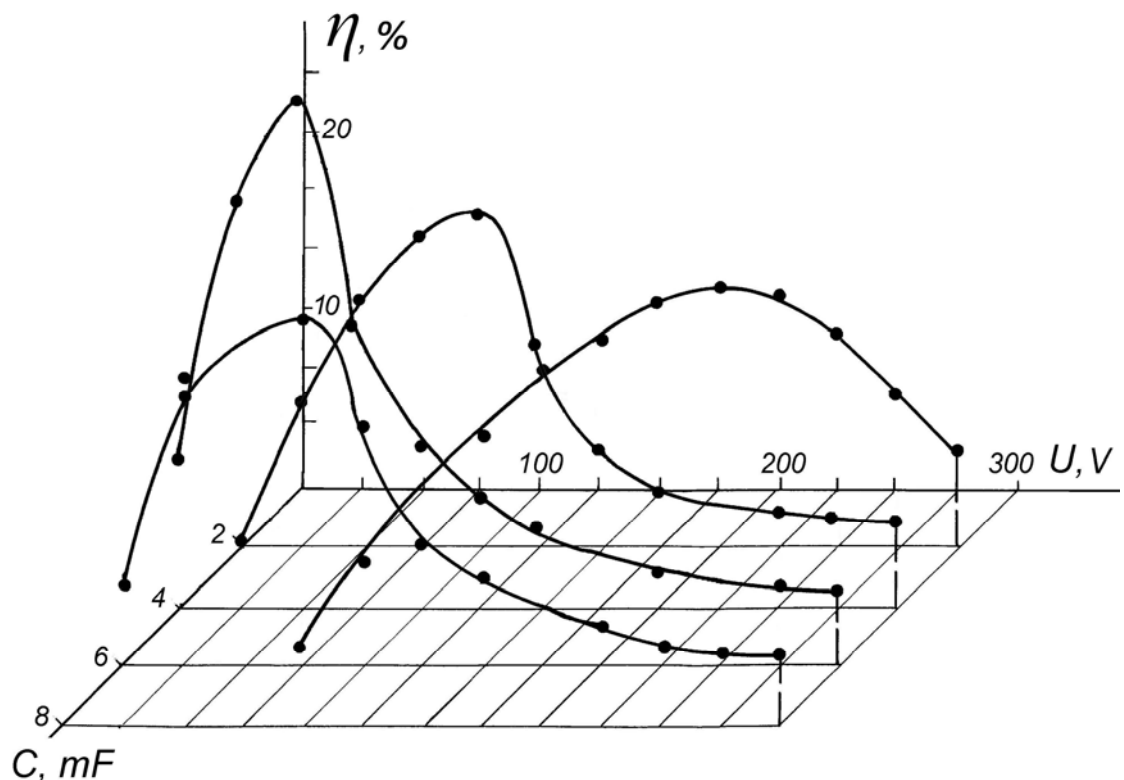


Рис. 4.5. Зависимость КПД СЭМИС от емкости и напряжения заряда ЕНЭ

На рис. 4.7 показаны зависимости определения емкости от напряжения заряда конденсатора для требуемых фиксированных энергий удара ЛЭМД (1; 2; 3; 4 и 5 Дж) при постоянном коэффициенте жесткости пружины $k=\text{const}$ и фиксированном рабочем воздушном зазоре $\delta=\text{const}$. Построение зависимостей производилось по формуле (4.3).

С учетом полученных экспериментальных зависимостей (рис. 4.2-4.4) была построена номограмма определения оптимальных параметров энергии заряда ЕНЭ для требуемых энергий удара и эффективности энергопреобразования в ЛЭМД при фиксированном воздушном зазоре $\delta=10$ мм (рис. 4.8). Для требуемой энергии удара $E_y=2$ Дж оптимальная емкость составляет $C=6,5$ мФ при напряжении заряда $U=45$ В и максимальном КПД $\eta \approx 30$ %, а для интервала значений энергий удара 1 – 5 Дж наиболее эффективно использовать ЕНЭ емкостью $C=2$ мФ и диапазоном напряжений заряда 70 – 180 В с КПД энергопреобразования не менее 15 %.

Выполненный анализ экспериментальных данных, полученных при питании ЛЭМД от ЕНЭ, выявил четко выраженный максимум в зависимости КПД от напряжения заряда для ряда емкостей при фиксированных $\delta=\text{const}$ и $k=\text{const}$; также выявлены максимумы эффективности энергопреобразования при соответствующем изменении величины воздушного зазора и фиксированном напряжении $U=\text{const}$.

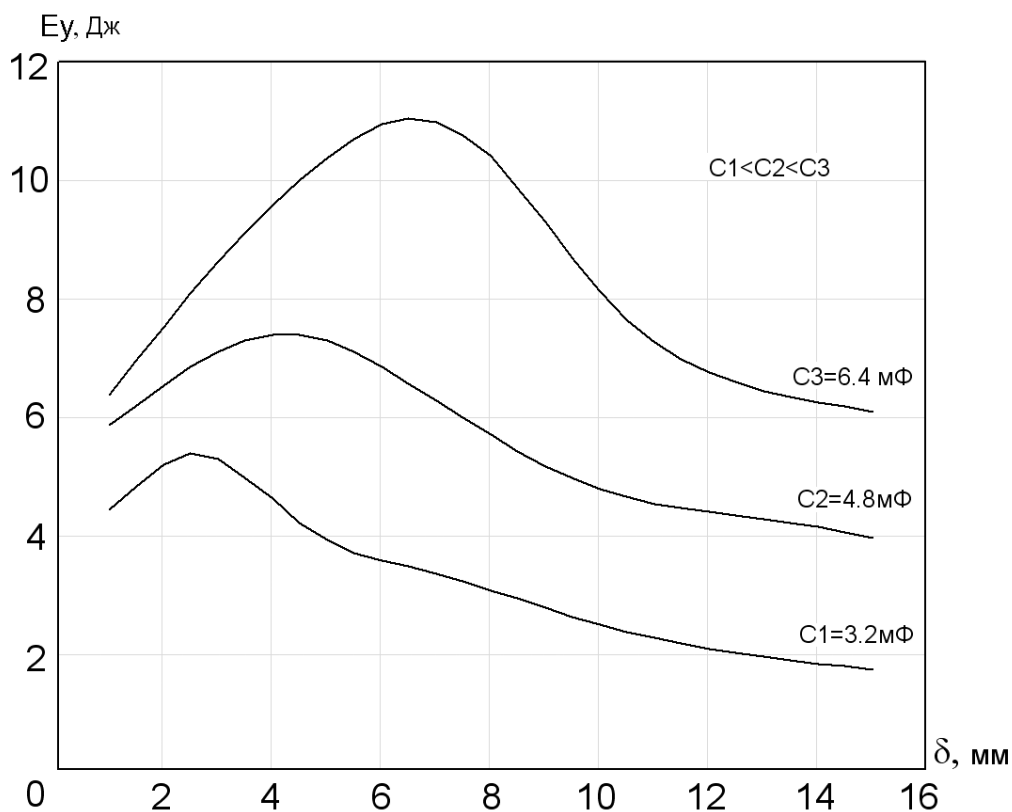


Рис. 4.6. Зависимости энергии удара ЛЭМД с емкостным накопителем от величины воздушного зазора при $k=\text{const}$, $U=\text{const}$

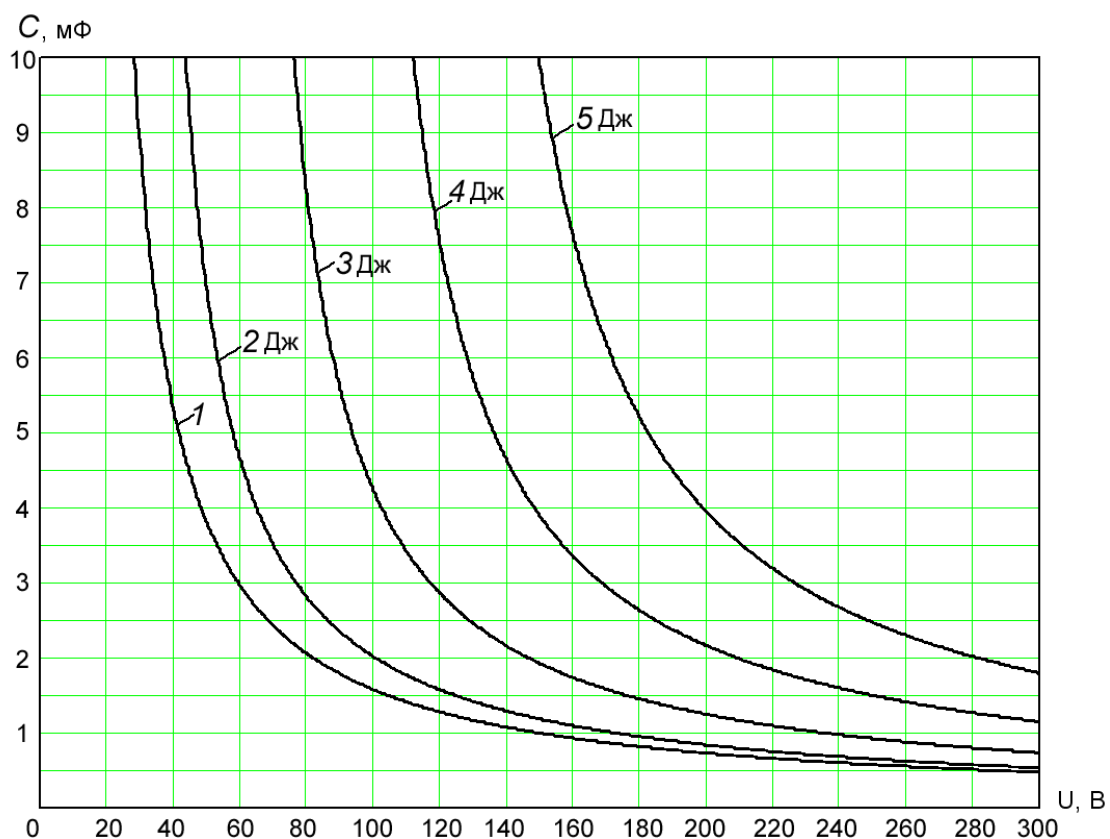


Рис. 4.7. Зависимости определения емкости и напряжения заряда конденсатора для требуемых фиксированных энергий удара ЛЭМД 1, 2, 3, 4, 5 Дж

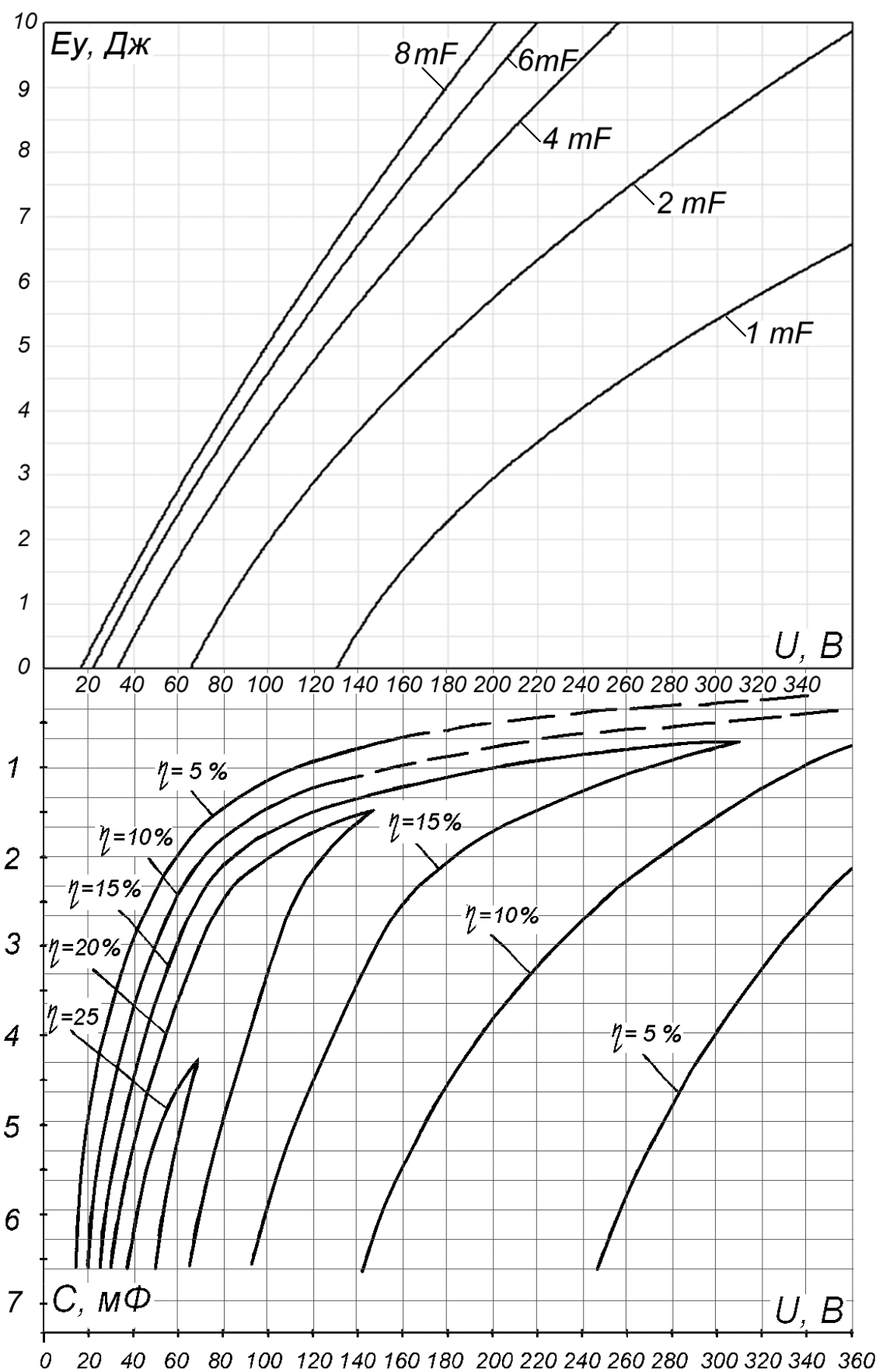


Рис. 4.8. Номограмма определения параметров энергии заряда ЕНЭ для требуемых энергии удара и эффективности энергопреобразования в ЛЭМД при фиксированном воздушном зазоре $\delta=10$ мм

Результаты экспериментально полученных зависимостей энергии удара и коэффициента эффективности энергопреобразования для исследуемой физической модели могут служить исходными данными для поиска с помощью теории подобия [111, 112] оптимальных параметров ЕНЭ для питания ЛЭМД различных геометрических размеров и обмоточных данных, обеспечивающих заданные энергетические параметры.

При перемещении якоря ЛЭМД происходит обмен энергии между накопителем энергии, магнитным полем и механической системой. Существуют оптимальные значения емкости накопительного конденсатора и напряжения заряда, которые обеспечивают при данных конструктивных параметрах ЛЭМД и фиксированной величине рабочего воздушного зазора максимальную эффективность энергопреобразования. В зависимости от величины емкости и напряжения заряда питающих конденсаторов изменяется оптимальное положение якоря (оптимальное значение рабочего воздушного зазора), при котором соблюдается наивысшая эффективность энергопреобразования.

4.2. Влияние параметров разрядного контура СЭМИС на характеристики импульса

В системах питания СЭМИС, предназначенной для технологических операций маркирования и клеймения, импульсы тока целесообразно получать путем разряда предварительно заряженной емкости непосредственно на обмотку возбуждения ЛЭМД. Регулируемые параметры разрядного контура влияют на форму импульсов тока, а следовательно, и на энергетические показатели СЭМИС. Очень важно определить степень воздействия каждого параметра и пределы его регулирования на энергетические показатели СЭМИС. Например, известно [81], что увеличение сопротивления контура R отрицательно сказывается на параметрах импульса, так как приводит к существенному уменьшению амплитуды и увеличению времени срабатывания, поэтому обмоточные провода во всех экспериментах выполнялись из материалов с высокой электропроводностью (медь). Схема наиболее простого импульсного источника тока в СЭМИС с ЕНЭ приведена на рис.2.2. Как следует из схемы, разрядный контур состоит из следующих элементов: ЕНЭ, управляемого вентиля и самого ЛЭМД.

Схема замещения разрядного контура, представленная на рис. 4.9, показывает, что в параметры контура входят емкость C_H и активное сопротивление R_H ЕНЭ (индуктивностью ЕНЭ пренебрегаем ввиду ее малости по отношению к общей индуктивности), активное сопротивление управляемого вентиля R_V , сопротивление $R_{ПР}$, индуктивность $L_{ПР}$ соединительных проводов и нелинейные активно-индуктивные сопротивления с переменными во времени

параметрами L-R ЛЭМД. Таким образом, эквивалентная схема замещения представляет собой разрядный контур, емкость которого равна емкости батареи, индуктивность – индуктивности ЛЭМД, активное сопротивление – сумме активных сопротивлений всех соединительных элементов и ЛЭМД.

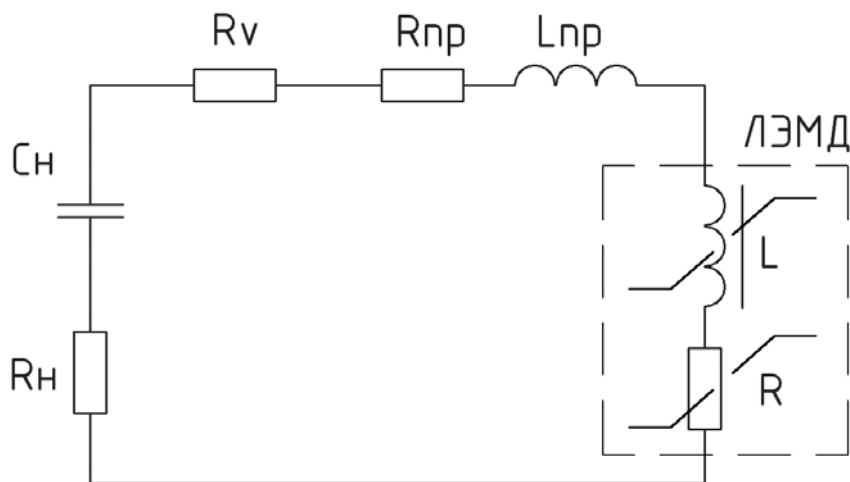


Рис.4.9. Схема замещения разрядного контура

Определим степень влияния параметров разрядного контура на характеристики импульса из анализа осциллограмм импульсов тока $i(t)$ и производной тока $di/dt(t)$ от времени, снятых при изменении какого-то одного из параметров при фиксированных остальных. Из зависимостей $i(t)$ мы получаем данные преимущественно об амплитуде и длительности импульсов, а из $di/dt(t)$ – о крутизне фронта импульса тока и времени срабатывания СЭМИС. На рис. 4.10-4.12 приведены осциллограммы импульсов тока а) и производной тока б) от времени в СЭМИС при аperiodических разрядах для следующих регулируемых параметров: напряжение заряда конденсатора, емкость конденсаторной батареи, число витков обмотки СЭМИС.

Рассмотрим, как влияет каждый из регулируемых параметров на характеристики импульсов тока при фиксированных остальных параметрах, при этом сравнивать импульсы будем по следующим критериям: амплитуда и длительность импульса, время нарастания максимума t_m , момент времени для крутизны фронта импульса t_k , время срабатывания СЭМИС.

Из рис. 4.10 следует, что при увеличении напряжения заряда ЕНЭ ($C=const, w=const$) пропорционально увеличивается амплитуда импульсов тока (рис. 4.10, а), но уменьшается время срабатывания СЭМИС $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$ (рис. 4.10, б), при этом длительность импульса практически не изменяется, на этом основан процесс форсированного включения СЭМИС. Также при увеличении напряжения уменьшается время нарастания импульса тока.

Из рис. 4.11 следует, что при увеличении емкости конденсатора ($U=const, w=const$) пропорционально увеличиваются амплитуда и длительность

импульсов тока (рис. 4.11, а), при этом крутизна фронта нарастания у импульсов почти не изменяется (рис. 4.11, б). Уменьшение времени срабатывания $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$ происходит при увеличении емкости $C_1 < C_2 < C_3$ (рис. 4.11, б), так как пропорционально увеличивается накопленная энергия.

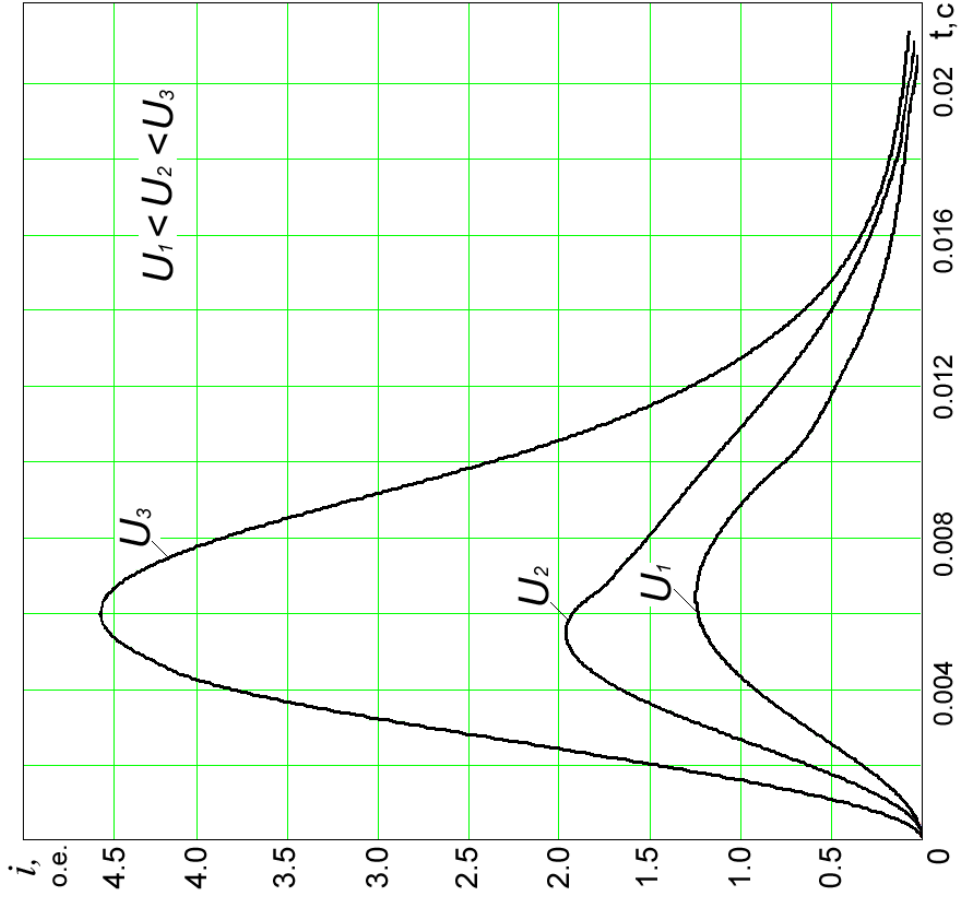
Для определения зависимости параметров импульсов тока от числа витков обмотки изготовлены для исследуемой СЭМИС три обмотки с различным числом витков. Были сняты осциллограммы тока СЭМИС с каждой из этих обмоток при питании от различных емкостей накопительных конденсаторов и выявлены следующие закономерности. Как следует из осциллограмм (рис. 4.12), для СЭМИС с меньшим числом витков (с индуктивностью обмотки) характерно:

- амплитуда импульса изменяется незначительно, например, уменьшение количества витков в 3,3 раза (уменьшение индуктивности обмотки L) приводит к уменьшению времени нарастания максимума тока на 60 %, тогда как амплитуда импульса увеличивается всего на 20 %, то есть для $w_1 < w_2$ характерно более быстрое установление максимума ($t_{m1} < t_{m2}$);
- крутизна фронта нарастания импульса выше (меньше момент времени для крутизны фронта импульса тока $t_{k1} < t_{k2}$).

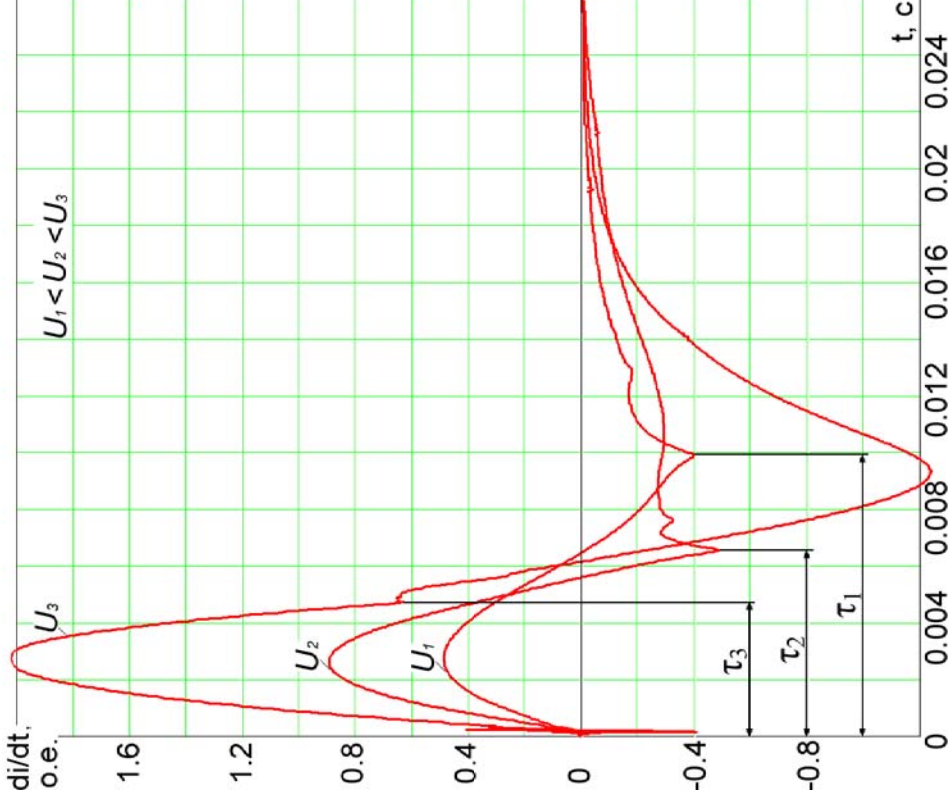
Из анализа рис. 4.10-4.12 следует, что амплитуду импульсов в ЛЭМД нужно регулировать изменением напряжения заряда ЕНЭ. Увеличение длительности импульса целесообразно за счет увеличения количества витков (индуктивности обмотки) ЛЭМД или увеличения емкости конденсаторной батареи, при этом амплитуда импульса меняется незначительно. Увеличение емкости хотя и приводит к некоторому возрастанию амплитуды и длительности импульса, однако выбор емкости накопителя следует производить из условий получения необходимой энергии удара, наивысшего КПД УМК и получения минимальных массогабаритных показателей устройства. Так как емкость конденсаторной батареи в УМК выбирается по вышеперечисленным критериям, то необходимая длительность импульса (согласованная со временем срабатывания ЛЭМД) выбирается за счет изменения количества витков.

Анализ приведенных осциллограмм показывает, что изменение одного параметра вызывает изменение как амплитуды, так и длительности импульсов тока, поэтому для повышения эффективности энергопреобразования в ЛЭМД УМК сложно отдельно осуществить регулировку амплитуды и длительности импульсов тока.

Поэтому амплитуда импульсов в устройствах маркирования и клеймения регулируется изменением напряжения заряда конденсатора, а длительность – подбором емкости батареи и количеством витков обмотки возбуждения ЛЭМД, что одновременно оказывает влияние на амплитуду импульсов тока.

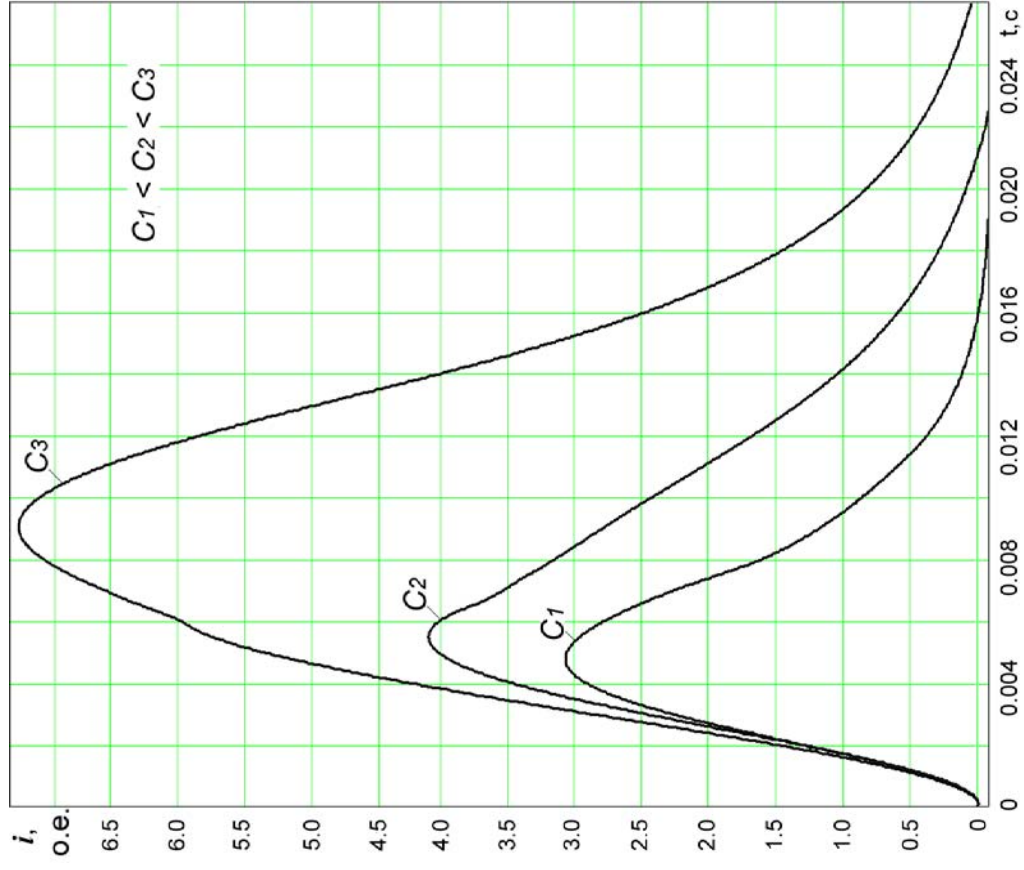


а)

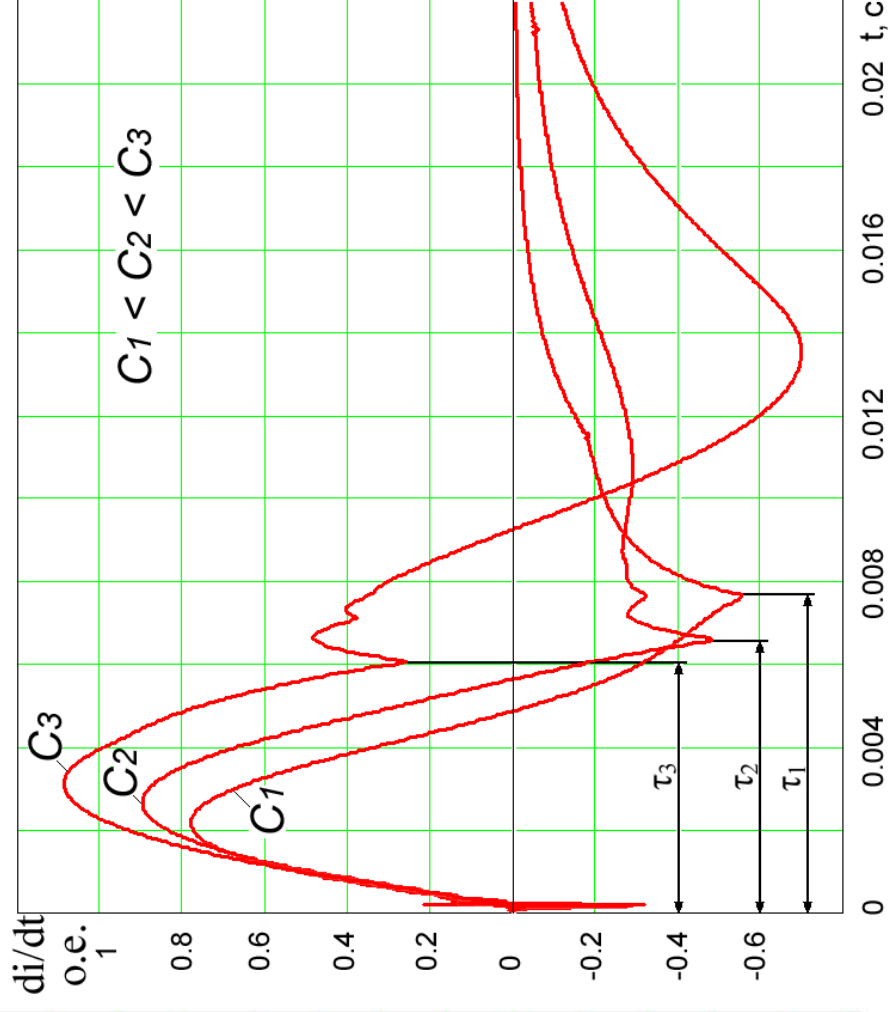


б)

Рис.4.10. Осциллограммы импульсов тока а) и производной тока б) от времени в СЭМИС при изменении напряжения заряда конденсатора $U_1=80$, $U_2=120$, $U_3=240$ В ($C=\text{const}$, $w=\text{const}$)

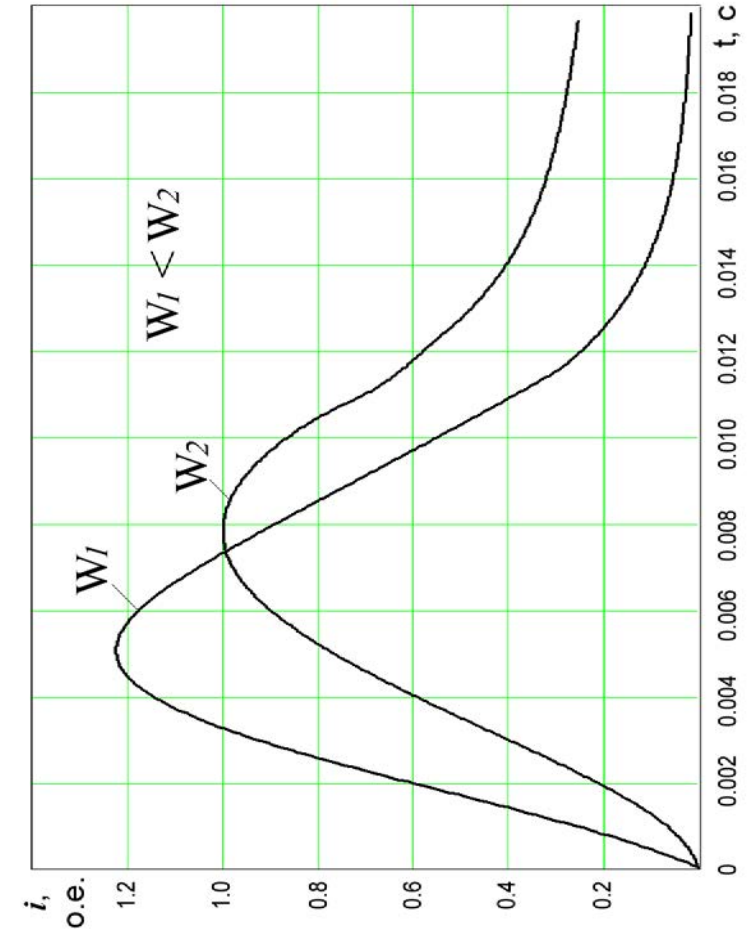


а)

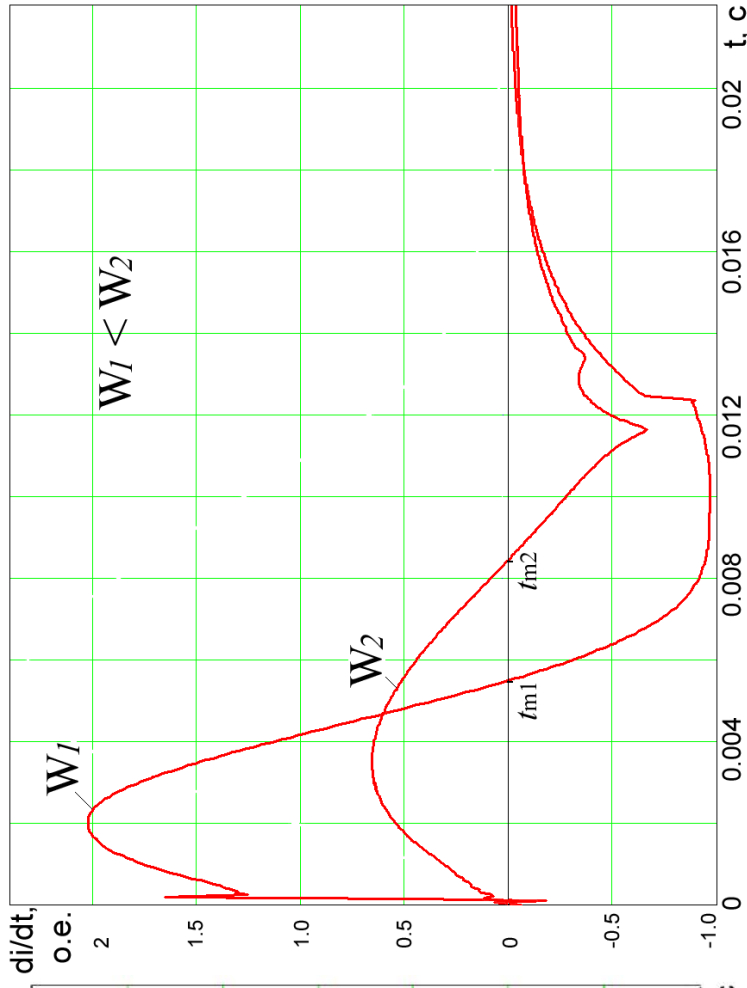


б)

Рис.4.11. Осциллограммы импульсов тока а) и производной тока б) от времени в СЭМИС при изменении емкости конденсатора $C_1=1,12$, $C_2=2,2$, $C_3=4,4$ мФ ($U=\text{const}$, $w=\text{const}$)



а)



б)

Рис.4.12. Осциллограммы импульсов тока а) и производной тока б) от времени в СЭМИС при изменении числа витков обмотки $w_1=75$, $w_2=250$ ($C=const$, $U=const$)

4.3. Оптимизации питания СЭМИС методом планирования эксперимента

В зависимости от поставленной задачи при многопараметрической и многофункциональной оптимизации требуется перебор большого числа вариантов. Однако вопрос определения оптимальных параметров может быть удовлетворительно решен при использовании математической теории планирования эксперимента.

Выполнение операций маркирования и клеймения требует определенных особенностей к конструкции магнитной системы ЛЭМД и процессам энергопреобразования. Анализ самых разнообразных конструкций магнитных систем ЛЭМД с учетом их применения позволил выделить оптимально подходящую к технологическим требованиям операций маркирования и клеймения. В результате выбрана конструкция импульсного ЛЭМД укороченной магнитной системы с комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами.

Разработка и исследование вопросов эффективного энергопреобразования в СЭМИС связаны с большим числом факторов, влияющих на такие показатели, как КПД энергопреобразования и удельная энергия удара. Аналитическое решение задачи затрудняется в связи с динамичностью, нестационарностью процессов намагничивания в импульсных магнитных полях с переменными во времени параметрами при движении якоря, сложностью распределения магнитного поля в системе, неопределенностью или изменчивостью картины потока рассеяния. Поэтому в основу был положен метод экспериментального исследования.

Формулирование цели эксперимента.

Выбор факторов и числа уровней их варьирования

На основании изучения статистических данных известно, что подбором соответствующих входных регулируемых параметров СЭМИС (силы противодействия рабочей пружины, емкости и напряжения заряда накопительного конденсатора, величины рабочего воздушного зазора и других) можно достичь рациональных режимов работы привода и повысить его энергетические характеристики.

При перемещении якоря СЭМИС происходит обмен энергии между накопителем энергии, магнитным полем и механической системой. Процессы, протекающие в данной электромеханической системе двигателя, описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_0 - \frac{1}{C} \int_0^{\tau} i dt &= iR + \frac{d\Psi}{dt} \\ F_{\text{Э}} &= m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{\text{ПР}} \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

где U_0 – начальное напряжение заряда емкостного накопителя; C – емкость конденсатора; R – активное сопротивление разрядной цепи СЭМИС (принимается постоянным); $\frac{d\Psi}{dt}$ – изменение потокосцепления во времени; m – масса якоря; $F_{\text{Э}}$ – электромагнитная сила; $F_{\text{ПР}}$ – сила противодействия рабочей пружины.

В качестве выходного параметра принимается энергия удара СЭМИС, который обозначается $E_y = y$ (отклик y). По условиям работы СЭМИС в УМК энергия удара должна изменяться в пределах от 1 до 20 Дж. Выходной параметр y зависит от типа и размеров магнитной системы, а при заданной конструкции СЭМИС и фиксированном начальном положении якоря, как следует из уравнений (4.4), определяется основными независимыми переменными:

во-первых, все силовые процессы формируют амплитуда, форма и длительность импульса тока, то есть функция изменения силы тока от времени $i(t)$, которая зависит от параметров ЕНЭ (варьируемые факторы – емкость C , напряжение заряда U_0);

во-вторых, противодействующее усилие возвратной пружины (варьируемый фактор – начальное значение силы упругости пружины $F_{\text{ПР}}$, Н).

Диапазоны изменения варьируемых параметров задаются условиями работы устройства:

$$22 < F_{\text{ПР}} < 37 \text{ Н}; \quad 2,2 < C < 6,4 \text{ мФ}; \quad 50 < U_0 < 200 \text{ В}. \quad (4.5)$$

Целью применения метода планирования эксперимента является, во-первых, получение аналитической зависимости энергии удара $E_y(F_{\text{ПР}}, C, U_0)$ ЛЭМД заданной конструкции как функций трех переменных от усилия противодействующей пружины $F_{\text{ПР}}$, напряжения заряда U_0 и емкости накопительного конденсатора C при фиксированном рабочем воздушном зазоре, во-вторых, отыскание таких значений переменных, при которых функция $E_y(F_{\text{ПР}}, C, U_0)$ достигает экспериментальных максимальных значений.

Для построения искомой зависимости применим аппарат ортогональных полиномов и планирования многоуровневых экспериментов [48, 49]. Для примера рассмотрим необходимое число уровней варьирования и кодирование фактора $E_y(F_{\text{ПР}}, C, U_0)$, для чего введем обычные обозначения: $F_{\text{ПР}} = X_1$, $C = X_2$, $U_0 = X_3$.

Теоретические предпосылки показывают, что в области исследования,

задаваемой границами (4.5), зависимость $E_y (F_{ПР}, C, U_0)$ нельзя описать линейной и даже квадратичной функцией.

Сила противодействия рабочей пружины изменяется в диапазоне 22 - 37 Н, на основании статистических данных зависимости энергии удара и КПД в этом диапазоне не очень сильно отличаются от линейных. Поэтому для фактора $F_{ПР}$ можно ограничиться двумя уровнями варьирования: нижний уровень $F_{ПРН}=22$ Н, верхний уровень $F_{ПРВ}=37$ Н. Шаг варьирования примем $d_1 = F_{ПРВ} - F_{ПРН} = 15$ Н. В соответствии с известной формулой [49] кодированная переменная определяется:

$$x_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{d_1 / 2} = \frac{k - 29,5}{7,5} = \begin{cases} -1 \text{ при } k = 22 \\ 1 \text{ при } k = 37 \end{cases}. \quad (4.6)$$

В процессе эксперимента кодированная переменная x_1 принимает только два значения: $x_{1н} = -1$ и $x_{1в} = +1$, т. е. число уровней варьирования $l_1 = 2$.

Емкость накопительного конденсатора по условиям работы изменяется в пределах от 2,2 до 6,4 мФ. На основании известных статистических данных (§ 4.2) при изменении емкости C в заданных пределах энергию удара нельзя аппроксимировать линейной зависимостью. Принимаем три уровня варьирования фактора $C = X_2$: $X_{21}=2,2$ мФ, $X_{22}=4,3$ мФ, $X_{23}=6,4$ мФ с шагом $d_2=2,1$ мФ. Тогда кодированная переменная при нечетном числе уровней в процессе эксперимента определяется:

$$x_2 = \frac{X_2 - \bar{X}_2}{d_2} = \frac{C - 4,3}{2,1} = \begin{cases} -1 \text{ при } C = 2,2 \\ 0 \text{ при } C = 4,3 \\ 1 \text{ при } C = 6,4 \end{cases} \quad (4.7)$$

(число уровней варьирования $l_2 = 3$).

Напряжение заряда конденсатора по условиям работы устройства может изменяться от 50 до 280 В, а наиболее важным является участок от 50 до 200 В. Примем четыре уровня фактора $U_0 = X_3$: $X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}$ с шагом $d_3 = 50$ В. Кодирова, имеем:

$$x_3 = \frac{X_3 - \bar{X}_3}{d_3 / 2} = \frac{U - 125}{25} = \begin{cases} -3 \text{ при } U_0 = 50 \\ -1 \text{ при } U_0 = 100 \\ 1 \text{ при } U_0 = 150 \\ 3 \text{ при } U_0 = 200 \end{cases}. \quad (4.8)$$

Переменная x_3 в эксперименте принимает четыре значения: $x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}$. Число уровней варьирования $l_3 = 4$. Общее число опытных точек $N = l_1 l_2 l_3 = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$.

В процессе эксперимента прямым методом измеряются напряжение заряда и противодействующее усилие, косвенным методом – емкость конденсатора и скорость якоря, по величине которой и формуле (4.3) рассчитывается энергия удара.

Измерения напряжения заряда, противодействующего усилия и емкости конденсатора имеют приведенную погрешность не выше 1%. Погрешность измерения скорости якоря не превышает 5%. Следовательно, выполняется основное требование к метрологии многофакторного эксперимента: ошибки измерения факторов значительно меньше их шага варьирования, точность установки уровней факторов выше точности измерения отклика.

Задачей эксперимента является построение по данным эксперимента полиномиальной зависимости — уравнения регрессии $\hat{Y}(x_1, x_2, x_3)$. Для получения полиномиальной модели в качестве базисных функций выбираются ортогональные полиномы [49].

Возможности построения модели того или иного вида зависят от числа и расположения опытных точек в факторном пространстве. В данном случае имеем полный факторный эксперимент типа $l_1 l_2 l_3 = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$, т. е. эксперимент состоит из 24 различных наборов, которые определяют в трехфакторном пространстве 24 опытные точки. В модель включаются ортогональные полиномы трех переменных, причем степень старшего полинома для любой переменной на единицу меньше числа уровней варьирования. Конкретные выражения для полиномов, входящих в модель СЭМИС, зависят от числа уровней варьирования l_i .

По первой переменной (сила противодействия пружины $F_{ПП}$), которая варьируется на двух уровнях, может быть взят только один полином первой степени

$$P_1(X_1) = \lambda_1 \frac{X_1 - \bar{X}_1}{d_1} = x_1 = P_1(x_1). \quad (4.9)$$

По второй переменной (емкость C), которая варьируется на трех уровнях, в модель могут входить два полинома: первой степени

$$P_1(X_2) = \lambda_1 \frac{X_2 - \bar{X}_2}{d_2} = x_2 = P_1(x_2); \quad (4.10)$$

второй степени

$$P_2(X_2) = \lambda_2 \left[\left(\frac{X_2 - \bar{X}_2}{d_2} \right)^2 - \frac{l_2^2 - 1}{12} \right] = 3x_2^2 - 2 = P_2(x_2). \quad (4.11)$$

По третьей переменной (напряжение U), которая варьируется на четырех уровнях, в модель могут входить три полинома: первой степени

$$P_1(X_3) = \lambda_1 \frac{X_3 - \bar{X}_3}{d_3} = x_3 = P_1(x_3); \quad (4.12)$$

второй степени

$$P_2(X_3) = \lambda_2 \left[\left(\frac{X_3 - \bar{X}_3}{d_3} \right)^2 - \frac{l_3^2 - 1}{12} \right] = \frac{1}{4} x_3^2 - \frac{5}{4} = P_2(x_3); \quad (4.13)$$

третьей степени

$$P_3(X_3) = \lambda_3 \left[\left(\frac{X_3 - \bar{X}_3}{d_3} \right)^3 - \left(\frac{X_3 - \bar{X}_3}{d_3} \right) \left(\frac{3l_3^2 - 7}{20} \right) \right] = \frac{5}{12} x_3^3 - \frac{41}{12} x_3 = P_3(x_3). \quad (4.14)$$

Составление модели по заданным базисным полиномам можно объяснить с помощью графа, изображенного на рис. 4.14. Вершины соответствуют имеющимся в модели полиномам трех переменных, а дуги обозначают умножение соответствующих полиномов. Необходимо обратить внимание на то, что модель не содержит произведений полиномов от одной и той же переменной. Это видно из рисунка, где вершины графа P_{12} , P_{22} не соединяются дугой так же, как вершины P_{13} , P_{23} , P_{33} , относящиеся к переменной x_3 .

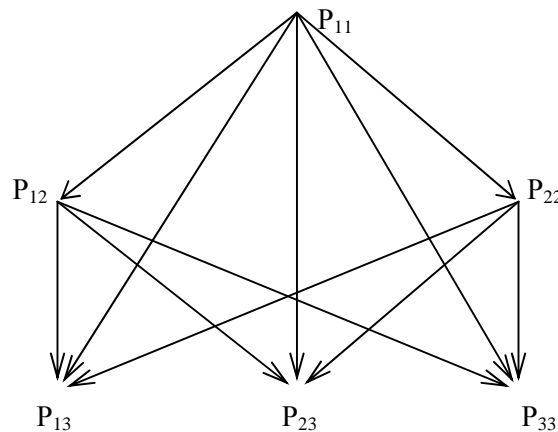


Рис. 4.14. Граф взаимодействия факторов ПФЭ 2x3x4 в исследуемой модели

В модель входят парные произведения полиномов – вершин, соединенных дугами, и тройные произведения – пути из вершины P_{11} в вершины переменной x_3 , включающие две дуги, т. е. проходящие через вершины P_{12} , P_{22} . Число парных взаимодействий равно числу дуг графа, а число тройных взаимодействий – числу путей из вершины P_{11} в вершины P_{13} , P_{23} , P_{33} , проходящих через вершины P_{12} , P_{22} , т. е. включающих по две дуги. Всего путей шесть. Таким образом, модель включает в себя свободный член b_0P_0 , шесть основных эффектов $b_{r_i}P_r(x_i)$, одиннадцать парных и шесть тройных взаимодействий – всего 24 члена. Общее выражение модели не записываем ввиду его громоздкости.

План эксперимента включает в себя 24 опытные точки. Опытные точки задаются в системе координат $0x_1x_2x_3$. Номера опытных точек, план и

результаты измерения отклика помещаются в табл. 4.1 (графы 1 – 4 и 20 соответственно). План разбит двойными линиями на четыре блока. В каждом блоке по шесть наблюдений. Четыре блока соответствуют четырем уровням фактора x_3 . В каждом блоке записываются все возможные наборы переменных x_1, x_2 .

В эксперименте применялись повторные опыты измерений отклика. В данном случае обработка результатов состоит из операций: вычисления b -коэффициентов, определения их статистической значимости, проверки адекватности модели.

В общем случае отыскиваемая модель содержит 24 неизвестных коэффициента. Для их вычисления по формуле [49]:

$$b_r = \frac{\sum_{u=1}^N P_r(x_u) \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N P_r^2(x_u)}, \quad (4.15)$$

где r – степень полинома; \bar{y}_u – среднее значение отклика в u -й точке, вычисленное по n параллельным опытам, $\bar{y}_u = \sum_{f=1}^n \frac{1}{n} y_{uf}$, составим структурную матрицу 24-го порядка.

В табл. 4.1 даны только столбцы тех членов модели, b -коэффициенты которых оказались статистически значимыми. В последней строке таблицы приведены b -коэффициенты. Их статистическая значимость определялась по общей методике, изложенной в [49].

Для проверки адекватности полученной модели вычисляются предсказанные значения отклика \hat{Y}_u , $u=1, 2, \dots, 24$. Эти значения и остатки $\varepsilon_u = Y_u - \hat{Y}_u$ даны в графах 20, 21 табл. 4.1. Затем находится дисперсия адекватности

$$S_{ad}^2 = \sum_{u=1}^{24} \frac{\varepsilon_u^2}{f_{ad}}, \quad (4.16)$$

где $f_{ad} = N - l = 24 - 18 = 6$ – число степеней свободы; $l = 18$ – число значимых b -коэффициентов; дисперсия адекватности $S_{ad}^2 = 0,02$ Дж. Дисперсия воспроизводимости $\sigma_y^2 = 0,015$ Дж. Следовательно, расчетное значение F_p -критерия $F_p = 0,02 / 0,015 = 1,33$. Его табличное значение для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и чисел степеней свободы $f_{ad} = 6$, $f_y = \infty$ определяется из [49]: $F_{табл} = 2,1$. Так как $F_p < F_{табл}$, модель следует признать адекватной имеющемуся статистическому материалу Y_u , $u=1, 2, \dots, 24$.

Таблица 4.1

План и результаты эксперимента ПФ 2х3х4

Набор	$P_{11} = X_1$	$P_{12} = X_2$	$P_{13} = X_3$	P_{22}	P_{23}	P_{33}	$P_{11} \cdot P_{12}$	$P_{11} \cdot P_{13}$	$P_{11} \cdot P_{33}$	$P_{12} \cdot P_{13}$	$P_{12} \cdot P_{23}$	$P_{12} \cdot P_{33}$	$P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{23}$	$P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{33}$	$P_{11} \cdot P_{22} \cdot P_{13}$	$Y_n = E_{y, Дж}$	$Y_n, Дж$	$\epsilon_n = Y_n - Y_n$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	3	1	3	-1	1	-3	1	-3	-1	3	0,11	0,1	0,01
2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-3	-1	3	-1	1	-3	1	-3	1	-3	0,08	0,07	0,01
3	-1	0	-3	-2	1	-1	0	3	1	0	0	0	6	-2	0	0	-6	1,13	1,1	0,03
4	1	0	-3	-2	1	-1	0	-3	-1	0	0	0	6	-2	0	0	6	0,9	0,91	-0,01
5	-1	1	-3	1	1	-1	-1	3	1	-3	1	-1	-3	1	3	1	-3	1,93	1,94	0,01
6	1	1	-3	1	1	-1	1	-3	-1	-3	1	-1	-3	1	-3	-1	3	1,87	1,88	-0,01
7	-1	-1	-3	1	-1	3	1	1	-3	1	1	-3	-1	-1	-1	3	1	2,34	2,36	-0,02
8	1	-1	-3	1	-1	3	-1	-1	3	1	1	-3	-1	-1	1	-3	-1	2,11	2,08	0,03
9	-1	0	-3	-2	-1	3	0	1	-3	0	0	0	2	2	0	0	-2	4,00	3,96	0,04
10	1	0	-3	-2	-1	3	0	-1	3	0	0	0	2	2	0	0	2	3,75	3,79	-0,04
11	-1	1	-3	1	-1	3	-1	1	-3	-1	-1	3	-1	-1	1	-3	1	4,57	4,59	-0,02
12	1	1	-3	1	-1	3	1	-1	3	-1	-1	3	-1	-1	-1	3	-1	4,61	4,6	0,01
13	-1	-1	-3	1	-1	-3	1	-1	3	-1	1	3	1	-1	1	-3	-1	4,05	4,06	-0,01
14	1	-1	-3	1	-1	-3	-1	1	-3	-1	1	3	1	-1	-1	3	1	4,56	4,57	-0,01
15	-1	0	-3	-2	-1	-3	0	-1	3	0	0	0	-2	2	0	0	2	6,18	6,17	0,01
16	1	0	-3	-2	-1	-3	0	1	-3	0	0	0	-2	2	0	0	-2	6,52	6,54	-0,02
17	-1	1	-3	1	-1	-3	-1	-1	3	1	-1	-3	1	-1	-1	3	-1	7,12	7,13	-0,01
18	1	1	-3	1	-1	-3	1	1	-3	1	-1	-3	1	-1	1	-3	1	7,17	7,18	-0,01
19	-1	-1	-3	1	1	1	1	-3	-1	-3	-1	-1	3	1	3	1	-3	6,48	6,50	-0,02
20	1	-1	-3	1	1	1	-1	3	1	-3	-1	-1	3	1	-3	-1	3	6,74	6,72	0,02
21	-1	0	-3	-2	1	1	0	-3	-1	0	0	0	-6	-2	0	0	6	7,89	7,87	0,02
22	1	0	-3	-2	1	1	0	3	1	0	0	0	-6	-2	0	0	-6	8,27	8,29	-0,02
23	-1	1	-3	1	1	1	-1	-3	-1	3	1	1	3	1	-3	-1	-3	8,44	8,48	-0,04
24	1	1	-3	1	1	1	1	3	1	3	1	1	3	1	3	1	3	8,74	8,72	0,02
i_q	0,044	1,125	1,132	-0,132	-0,184	-0,018	-0,012	0,043	-0,023	0,024	-0,176	-0,03	-0,026	0,05	0,012	0,03	0,01	4,565		

В результате обработки экспериментальных данных в модель вошли полиномы и произведения полиномов (см. табл. 4.1). Адекватное уравнение модели для энергии удара имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y} = & 4,565 + 0,044P_{11} + 1,125P_{12} + 1,132P_{13} - 0,132P_{22} - 0,184P_{23} - 0,018P_{33} - 0,012P_{11}P_{12} + \\ & + 0,043P_{11}P_{13} - 0,023P_{11}P_{33} + 0,024P_{12}P_{13} - 0,176P_{12}P_{23} - 0,03P_{12}P_{33} - 0,026P_{22}P_{13} + \\ & + 0,05P_{22}P_{23} + 0,012P_{11}P_{12}P_{23} + 0,03P_{11}P_{12}P_{33} + 0,01P_{11}P_{22}P_{13}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где первый индекс полинома означает степень, второй – номер фактора.

Для проведения различных исследований модели (4.17) необходимо вместо символов P_{ii} подставить их аналитические выражения (4.9) - (4.14). Тогда после приведения подобных членов получим:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(x_1, x_2, x_3) = & 5,184 + 0,044x_1 + 1,345x_2 + 1,246x_3 - 0,58x_2^2 - 0,071x_3^2 - 0,0075x_3^3 - \\ & - 0,027x_1x_2 + 0,14x_1x_3 - 0,01x_1x_2^2 + 0,0014x_1x_3^2 - 0,01x_1x_3^3 + 0,13x_2x_3 - 0,044x_2x_3^2 - 0,013x_2x_3^3 - \\ & - 0,078x_2^2x_3 + 0,0375x_2^2x_3^2 - 0,11x_1x_2x_3 + 0,003x_1x_2x_3^2 + 0,0125x_1x_2x_3^3 - 0,027x_1x_2^2x_3. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Произведем детерминистский анализ модели (4.18). Модель (4.17) удобна для определения значений \dot{Y}_u в узловых (опытных) точках плана. В процессе эксперимента переменные x_1, x_2, x_3 (графы 2–4 табл.4.1) принимают только целочисленные значения. В процессе функционирования системы они могут иметь любые значения, лежащие внутри параллелепипеда $2 \times 3 \times 4$.

Коэффициенты при первых степенях переменных показывают приращение энергии удара СЭМИС, когда соответствующий фактор x_i изменяется на единицу. Например, если при фиксированных факторах $U=150$ В, $C=2,2$ мФ увеличить противодействующее усилие на 7,5 Н ($x_1=1$), энергия удара уменьшится на 0,51 Дж, а при увеличении емкости ЕНЭ на 2,1 мФ ($x_2=1$) и фиксированных $U=150$ В, $F_{ПП}=22$ Н энергия удара возрастает на 2,13 Дж.

Как следует из уравнения модели (4.18), кроме линейных эффектов имеют место нелинейные эффекты второго и третьего факторов и эффекты взаимодействия различных степеней факторов. Поэтому влияние той или иной переменной на отклик y определяется всеми членами модели, в которые входит данная переменная.

Рассмотрим влияние переменных x_2, x_3 (или C, U) на отклик \dot{Y} , когда начальное противодействующее усилие равно $F_{ПП}=29,5$ Н ($x_1=0$). В этом случае уравнение модели (4.18) примет вид:

$$\hat{Y}(x_1, x_2, x_3)|_{x_1=0} = 5,184 + 1,345x_2 + 1,246x_3 - 0,58x_2^2 - 0,071x_3^2 - 0,0075x_3^3 + 0,13x_2x_3 - 0,044x_2x_3^2 - 0,013x_2x_3^3 - 0,078x_2^2x_3 + 0,0375x_2^2x_3^2. \quad (4.19)$$

Из формулы видно, что влияние на отклик переменной x_2 (емкости ЕНЭ) зависит от того, какое значение принимает переменная x_3 (напряжение заряда). При трех значениях переменной $x_3 = (-1; 0; 1)$ и $x_1 = 0$ зависимость энергии удара от емкости накопительного конденсатора определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(x_2)|_{x_3=1} &= 3,875 + 1,184x_2 - 0,465x_2^2; \\ \hat{Y}(x_2)|_{x_3=0} &= 6,352 + 1,418x_2 - 0,621x_2^2; \\ \hat{Y}(x_2)|_{x_3=-1} &= 8,081 + 0,988x_2 - 0,477x_2^2. \end{aligned} \quad (4.20)$$

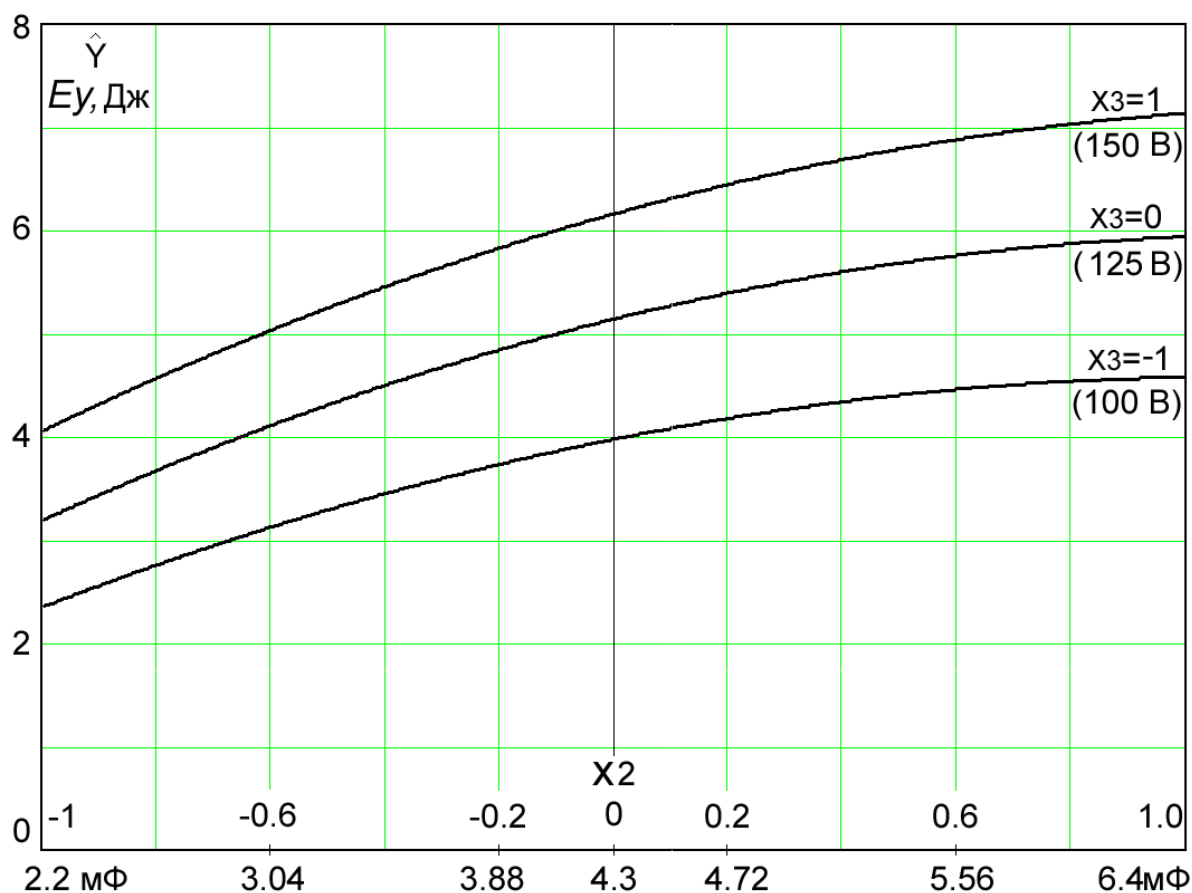


Рис. 4.15. Зависимости энергии удара $E_y = \hat{Y}$ модели от емкости для ряда напряжений заряда при силе противодействия пружины $F_{пр} = 29,5$ Н

На рис. 4.15 на оси абсцисс кроме кодированной переменной x_2 показана емкость ЕНЭ, мФ; по оси ординат отложено значение энергии удара E_y , Дж, согласно зависимостям (4.20). Из выражений (4.20) и рис. 4.15 следует, что взаимодействие факторов емкости и напряжения заряда, которое в уравнении (4.19) описывается слагаемыми $0,13x_2x_3$, $-0,044x_2x_3^2$, $-0,013x_2x_3^3$, $-0,078x_2^2x_3$, $0,0375x_2^2x_3^2$, проявляется в следующем: при увеличении напряжения

увеличивается наклон кривой $\dot{Y}(x_2)=E_y(C)$ к оси ординат. Это приводит к увеличению эффективности емкости в интервале области исследования, т. е. одному и тому же приращению емкости будут соответствовать большие приращения энергии удара E_y . В то же время с увеличением напряжения в интервале рассмотренных емкостей одинаковым приращениям напряжений заряда соответствуют меньшие приращения энергии удара E_y .

Определять экстремальные значения отклика в данном случае не имеет смысла, так как функции $\dot{Y}(x_2)$, $\dot{Y}(x_3)$ монотонно возрастающие в области исследования эксперимента.

Рассмотрим влияние переменных x_1 , x_3 (или $F_{ПП}$, U) на отклик \dot{Y} , когда емкость накопительного конденсатора равна $C = 2,2$ мФ ($x_2=0$). В этом случае уравнение модели (4.18) примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(x_1, x_2, x_3)|_{x_2=0} = & 5,184 + 0,044x_1 + 1,246x_3 - 0,071x_3^2 - 0,0075x_3^3 + 0,14x_1x_3 - \\ & - 0,0014x_1x_3^2 - 0,01x_1x_3^3. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Из формулы следует, что влияние на отклик переменной x_3 (напряжение заряда) зависит от того, какое значение принимает переменная x_1 (начальное противодействующее усилие). При двух значениях переменной $x_1 = (-1; 1)$ и $x_2=0$ зависимость энергии удара от напряжения заряда накопительного конденсатора определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{Y}(x_3)|_{x_1=-1} = & 5,14 + 1,106x_3 - 0,072x_3^2 + 0,003x_3^3; \\ \dot{Y}(x_3)|_{x_1=1} = & 5,23 + 1,386x_3 - 0,068x_3^2 - 0,0175x_3^3. \end{aligned} \quad (4.22)$$

То есть одинаковым значениям напряжения при различных противодействующих усилиях будут соответствовать различные значения энергии удара E_y .

На рис. 4.16 кроме кодированной переменной x_2 показано напряжение заряда, V ; по оси ординат отложено значение энергии удара E_y , Дж, согласно зависимостям (4.22).

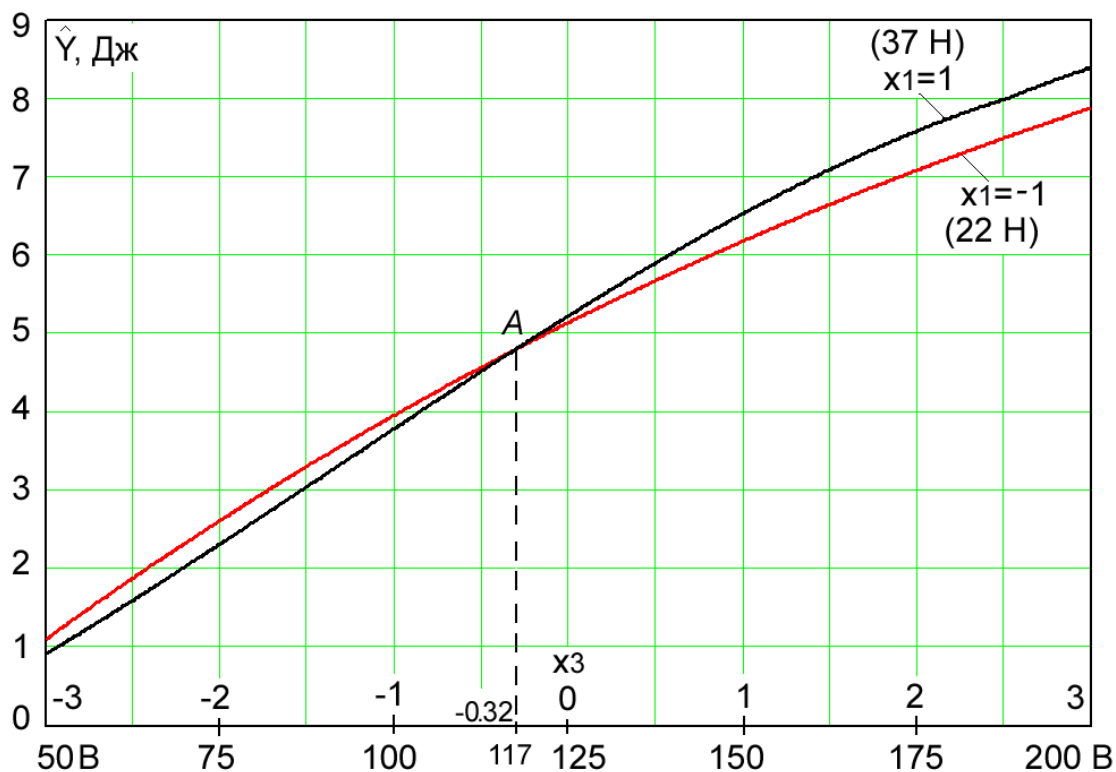


Рис. 4.16. Зависимости энергии удара $E_y = \hat{Y}$ модели СЭМИС от напряжения заряда конденсатора емкостью $C = 2,2$ мФ для двух значений противодействующих усилий $F_{пр1} = 22$ Н, $F_{пр2} = 37$ Н

Из выражений (4.22) и рис. 4.16 видно, что взаимодействие факторов начального противодействующего усилия (x_1) и напряжения заряда (x_3) проявляется в следующем: существует оптимальное противодействующее усилие для данного напряжения заряда фиксированной емкости (x_2), при котором наблюдается наивысшая энергия удара ($E_y = \hat{Y}$), эта точка на рис. 4.16 обозначена т. А. Физически это означает: чтобы получить наивысшую энергию удара фиксированной емкости $C = 2,2$ мФ ($x_2 = 0$) для напряжений заряда в интервале ниже т. А $-3 < x_3 < -0,32$ ($50\text{В} < U < U_A = 117\text{В}$), величина противодействующего усилия должна быть меньше 37 Н ($x_1 = 1$), а для интервала выше точки А $-0,32 < x_3 < 3$ ($U_A = 117\text{В} < U < 200\text{В}$) – больше 22 Н ($x_1 = -1$). Таким образом, правильно рассчитанное (подобранное) усилие противодействующей пружины приводит к увеличению эффективности энергопреобразования (4.2) в СЭМИС.

5. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СЭМИС В УМК

5.1. Методика расчета СЭМИС для технологических операций маркирования и клеймения

Наряду с установлением оптимальных соотношений размеров магнитопровода выявление взаимосвязей основных параметров СЭМИС является важнейшей задачей, от решения которой во многом зависит разработка методов проектных и инженерных расчетов СЭМИС. Известные методы расчета электромагнитов постоянного тока [1, 15, 113] достаточно сложны и охватывают большое количество второстепенных параметров, из которых не видна взаимосвязь основных параметров. Импульсное питание от ЕНЭ накладывает определенные особенности на расчет основных параметров СЭМИС.

Предлагаемая методика расчета СЭМИС иллюстрируется конкретными числовыми примерами. В качестве исходных для расчета данных взяты характеристики СЭМИС, исследованной экспериментально (глава 4).

1. При расчете диаметра якоря для упрощения вычислений предлагается использовать некоторый усредненный показатель – предельную удельную энергию воздействия (удара) σ_y , которая определялась по данным экспериментальных исследований [75] как отношение максимальной энергии деформации (удара) A_{max} к сечению якоря ЛЭМД.

Определим диаметр якоря ЛЭМД из соотношения:

$$d_{\text{я}} = 2 \sqrt{\frac{A_{\text{max}}}{\pi \cdot k_d \cdot \sigma_y}}, \quad (5.1)$$

где $\sigma_y = 1,6 \text{ Дж/см}^2$ – предельная удельная энергия воздействия ЛЭМД;

k_d – коэффициент, учитывающий глубину проникновения импульсного магнитного поля в МС, зависящий от величины диаметра якоря для МС с комбинированным якорем (для МС продольно-поперечного поля – от диаметра стержня).

Расчет по формуле (5.1) производят следующим образом: принимают $k_d=1$, после предварительного расчета $d'_{\text{я}}$ значение k_d уточняют по данным табл. 5.1, полученным на основании ряда экспериментальных исследований физических моделей ЛЭМД с различными геометрическими параметрами.

Таблица 5.1

Диаметр якоря, мм	k_d
1. До 20	1,0
2. 20-40	0,94
3. 40-60	0,88
4. 60-80	0,8
5. 80-100	0,75
6. 100-150*	0,7
7. 150-200*	0,65

Примечание: * - для данных диаметров значения k_d аппроксимированы.

2. Используя оптимальные соотношения [4, 39] для основных геометрических размеров: длины обмотки возбуждения к диаметру якоря $q=L/d_{\text{я}}=1$, диаметра якоря к внешнему диаметру $\gamma=d_{\text{я}}/D=0,5$ при высоте стопа $h_c=0,3 \cdot L$, определяем следующие параметры:

- внешний диаметр $D = \frac{d_{\text{я}}}{\gamma}$;
- длину обмотки возбуждения $L = d_{\beta} \cdot q$;
- высоту стопа и толщину крышки якоря $h_c = h_{\text{я}} = 0,3 \cdot L$.

3. Массу якоря вычисляем по формуле:

$$m_{\text{я}} = \frac{1}{4} \cdot k_c \cdot \pi \cdot \rho_c \cdot (d_{\text{я}}^2 \cdot (L - h_c) + D^2 \cdot h_{\text{я}}) , \quad (5.3)$$

где ρ_c – плотность стали Ст20; k_c - коэффициент, учитывающий массу штока якоря и клеймительной головки, выбирается в пределах 1,15 – 1,2.

4. Коэффициент жесткости возвратной пружины определим из выражения:

$$k = (2 \div 2,5) \cdot \frac{m_{\text{я}} \cdot g}{\delta_0} , \quad (5.4)$$

где $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

5. Учитывая, что значительная доля энергии удара приходится на кинетическую энергию якоря, имеем:

$$A_{\max} = \frac{m_{\text{я}} \cdot V_{\max}^2}{2}, \quad (5.5)$$

откуда
$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\max}}{m_{\text{я}}}}.$$

Время движения ориентировочно определим по формуле равноускоренного движения:

$$t_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot \delta_0}{V_{\max}}. \quad (5.6)$$

6. Предварительно определим количество витков обмотки возбуждения:

$$w = \frac{k_{\text{п}} \cdot U \cdot \tau_{\text{и}}}{S_{\text{я}} \cdot \Delta B}, \quad (5.7)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент обмоточных потерь [55], выбирается в пределах 0,5..0,6; ΔB – приращение магнитной индукции; U – напряжение заряда ЕНЭ;

$\tau_{\text{и}}$ – длительность питающего импульса, принимается $\tau_{\text{и}} = 2 \cdot t_{\text{дв}}$;

$S_{\text{я}} = \pi \cdot d_{\text{я}}^2 / 4$ – сечение якоря.

7. Сечение провода определяем по формуле [114]:

$$q_{\text{пр}} = \frac{(D - d_{\text{я}}) \cdot L}{2 \cdot w} \cdot f_0, \quad (5.8)$$

где f_0 – коэффициент заполнения витков обмотки в окне МС СЭМИС, для обмотки залитой эпоксидным компаундом по данным [114] $f_0 = 0,6$.

Предварительно определяем диаметр обмоточного провода:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{\text{пр}}}{\pi}}.$$

Из стандартного ряда размеров проводов круглого сечения выбирается ближайшее значение диаметра голого провода. Тогда из формулы (5.8) окончательно определяем количество витков в обмотке:

$$w = \frac{(D - d_{\text{я}}) \cdot L}{2 \cdot q_{\text{пр}}} \cdot f_0. \quad (5.9)$$

8. Требуемая энергия заряда ЕНЭ с учетом эффективности энергопреобразования должна удовлетворять неравенству:

$$E_C \geq \frac{1}{\eta} A_{\max}, \quad (5.10)$$

где η – коэффициент эффективности энергопреобразования СЭМИС, выбираемый с учетом имеющихся экспериментальных данных в пределах 0,1-0,25. Так как энергия заряда определяется по формуле:

$$E_C = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (5.11)$$

то с учетом (5.10) определяем требуемую емкость накопителя:

$$C = \frac{2 \cdot A_{\max}}{\eta \cdot U^2}. \quad (5.12)$$

При расчете ЕНЭ количество и тип конденсаторов можно определить по основным параметрам E_C и U .

Количество конденсаторов

$$n = \frac{E_C}{E_{ED}}, \quad (5.13)$$

где E_{ED} – номинальная энергия одного конденсатора. При получении по формуле (5.13) дробного числа количество конденсаторов округляется в сторону большего числа.

9. Необходимую МДС обмотки определяем для рабочего зазора $0,5 \cdot \delta_0$ без учета сопротивления стали по закону полного тока:

$$F = Iw = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \cdot \delta_0, \quad (5.14)$$

где B_δ – принимаемая индукция в воздушном зазоре.

10. Проверка на допустимую плотность тока в обмотке выполняется по соотношению:

$$j = \frac{F}{w \cdot q_{пр}} \leq j_{доп}, \quad (5.15)$$

где $j_{доп}$ – допустимая плотность тока для данного режима работы СЭМИС.

11. По известному коэффициенту теплопередачи и допустимому перепаду температур ΔQ могут быть определены ориентировочные значения удельной тепловой нагрузки P_y . Для максимальной температуры окружающей среды $t_c=40^0$ С и обмотки с изоляцией класса А допустимый перепад температуры составляет $\Delta Q = 60 \div 65^0$ С.

Удельная тепловая нагрузка не должна превышать максимальную:

$$P_{y\max} = k_T \cdot \Delta Q, \quad (5.16)$$

где $k_T = 10 \dots 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{с}^2)$ – коэффициент теплопередачи [64].

Мощность потерь в медном проводе круглого сечения диаметром d_{np} с удельным сопротивлением ρ_m при прохождении импульсного тока длительностью $\tau_{и}$ и частотой следования импульсов f можно определить по формуле [64]:

$$P_m = \rho_m \cdot j^2 \cdot q_{\text{ПР}} \cdot l_{\text{ПР}} \cdot \tau_{и} \cdot f, \quad (5.17)$$

где $l_{\text{ПР}} = \pi \cdot 0,5 \cdot (d_{я} + D) \cdot w$ – длина обмоточного провода.

Проверкой выполнения условия $P_y \leq P_{y\max}$ заканчивают данный расчет, в случае его невыполнения принимают другие данные или корректируют начальные условия. По данной методике ниже приведен пример расчета.

Пример. Рассчитать СЭМИС для УМК с максимальной энергией деформации $A_{\max} = 15$ Дж и рабочим воздушным зазором $\delta_0 = 10$ мм с высокими удельными массогабаритными показателями. Максимальная частота ходов определяется режимом работы и в пределе составляет $f = 3$ Гц. Конструкция магнитной системы – укороченная со стопом и с комбинированным якорем (рис. 2.10, а), выполнена из низкоуглеродистой стали марки Ст20. Источник питания – промышленная сеть 220 В.

1. Определим диаметр якоря по формуле (5.1) с учетом данных табл. 5.1:

$$d'_{я} = 2 \sqrt{\frac{15}{3,14 \cdot 1,0 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} = 0,0345 \text{ (м)} = 34,5 \text{ (мм)};$$

по табл.5.1 $k_d = 0,94$: $d_{я} = 2 \sqrt{\frac{1}{3,14 \cdot 0,94} \cdot \frac{15}{1,6}} = 0,0356 \text{ (м)} = 35,6 \text{ (мм)}$, принимаем 36 мм.

2. Используя соотношения (5.2), определяем:

- внешний диаметр $D = \frac{d_{я}}{\gamma} = \frac{36}{0,5} = 72 \text{ (мм)}$;

- длина обмотки возбуждения $L = d_{я} \cdot q = 36 \cdot 1,0 = 36 \text{ (мм)}$;

- высота стопа и толщина крышки якоря $h_c = h_{я} = 0,3 \cdot L = 10,8 \text{ (мм)}$.

3. Массу якоря вычисляем по формуле (5.3), принимая $k_c = 1,18$:

$$m_{я} = \frac{1}{4} \cdot 1,18 \cdot 3,14 \cdot 7800 \cdot (36^2 \cdot (36 - 10,8) + 72^2 \cdot 10,8) \cdot 10^{-9} = 0,64 \text{ (кг)}.$$

4. Коэффициент жесткости возвратной пружины определим из выражения (5.4):

$$k = 2 \cdot \frac{0,64 \cdot 9,8}{10^{-2}} = 1250 \text{ (Н/м)}.$$

5. Максимальную требуемую скорость якоря ЛЭМД определим из выражения (5.5):

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\max}}{m_{я}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15}{0,64}} = 6,85 \text{ (м/с)},$$

время движения определим по формуле (5.6):

$$t_{\delta\delta} = \frac{2 \cdot \delta_0}{V_{\max}} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{6,85} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

6. Количество витков обмотки возбуждения определим по формуле (5.7), предварительно приняв коэффициент обмоточных потерь $k_{\pi}=0,5$; учитывая, что решается задача расчета ЛЭМД по критерию минимальных массогабаритных показателей, используем весь шлейф кривой намагничивания низкоуглеродистой стали $\Delta B=2$ Тл; задаемся максимальным напряжением заряда ЕНЭ, равным $U=280$ В; длительность питающего импульса должна быть более времени движения якоря для получения максимальной удельной энергии воздействия, принимаем $\tau_{II} = 2 \cdot t_{\delta\delta} = 2 \cdot 2,9 \cdot 10^{-3} = 5,8 \cdot 10^{-3}$ с; сечение якоря равно $S_{я} = 3,14 \cdot (36 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 0,00102 \text{ м}^2$, получим:

$$w = \frac{280 \cdot 5,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,00102 \cdot 2} = 398.$$

7. Определяем сечение провода по формуле (5.8), учитывая, что коэффициент заполнения витков для обмотки, залитой эпоксидным компаундом, по данным [114] равен $f_0=0,6$.

$$q_{np} = \frac{(72 - 36) \cdot 36}{2 \cdot 398} \cdot 0,6 = 0,977 \text{ мм}^2,$$

Предварительно диаметр обмоточного провода будет равен:

$$d_{np} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{np}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,977}{3,14}} = 1,11 \text{ (мм)}.$$

Из стандартного ряда размеров проводов круглого сечения выбираем ближайшее значение диаметра голого провода: $d_{np} = 1,12$ мм, $q_{np} = 0,9852 \text{ мм}^2$, диаметр с изоляцией для провода типа ПЭВ $d_{np} = 1,23$ мм.

Тогда по формуле (5.9) окончательно определяем количество витков в обмотке:

$$w = \frac{(D - d_{\text{я}}) \cdot L \cdot f_0}{2 \cdot q_{\text{пр}}} = \frac{(72 - 36) \cdot 36}{2 \cdot 0,9852} \cdot 0,6 = 395.$$

8. Принимаем коэффициент эффективности энергопреобразования $\eta=0,15$, по формуле (5.12) определяем требуемую емкость накопителя:

$$C = \frac{2 \cdot 15}{0,15 \cdot 280^2} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ (Ф)}.$$

Исходя из критериев минимальных массогабаритных показателей и минимальной стоимости выбираем импульсные электролитические конденсаторы типа К-50-17 номинальным напряжением 300 В, единичной емкостью $C_{\text{ед}}=0,8$ мФ.

Таким образом, требуемое количество конденсаторов

$$n = C / C_{\text{ед}} = 2,55 / 0,8 = 3,2 \approx 4,0 \text{ шт.}$$

9. Принимаем индукцию в воздушном зазоре $0,5 \cdot \delta_0$ равной $B_{\delta}=1,65$ Тл, значение B_{δ} определялось по колену кривой намагничивания Ст20 [113].

По формуле (5.14) необходимая МДС обмотки:

$$I_w = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,65 \cdot 10^{-2} = 11030 \text{ (А)}.$$

10. По формуле (5.15) плотность тока в обмоточном проводе:

$$j = \frac{11030}{395 \cdot 0,9852} = 28,37 \text{ А/мм}^2,$$

что является близко к допустимой $j_{\text{доп}}=30$ А/мм² для повторно-кратковременного режима работы [114].

11. Если принять максимальную температуру окружающей среды $t_c=40^{\circ}$ С, то для ЛЭМД с изоляцией класса А допустимый перепад температуры составит $\Delta\Theta = 60 \div 65$ С.

Таким образом, максимальная удельная тепловая нагрузка составляет:

$$P_{y \text{ max}} = k_T \cdot \Delta\Theta = 10 \cdot 65 = 650 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Учитывая, что длина обмоточного провода

$$l_{\text{пр}} = \pi \cdot 0,5 \cdot (d_{\text{я}} + D) \cdot w = 3,14 \cdot 0,5 \cdot (72 + 36) \cdot 395 = 33,5 \text{ (м)},$$

максимальная удельная тепловая нагрузка составляет (5.17):

$$P_m = 0,017 \cdot 28,37^2 \cdot 0,9852 \cdot 33,5 \cdot 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 7,85 \text{ (Вт)}.$$

Термическое сопротивление в осевом направлении ЛЭМД во много раз превышает радиальное, поэтому теплоотдача с торцевых поверхностей незначительна, ею пренебрегаем. Площадь поверхности охлаждения обмоток, соприкасающихся с воздухом через МС, определяем по формуле:

$$S_o = \pi \cdot (D + d_{\text{вн}})L = 3,14 \cdot (72 + 36) \cdot 10^{-6} \cdot 36 = 1,22 \cdot 10^{-2} \text{ (м}^2\text{)}.$$

Тогда удельная тепловая нагрузка СЭМИС:

$$P_y = \frac{P_m}{S_o} = \frac{7,85}{1,22 \cdot 10^{-2}} = 643,0 \text{ (Вт/м}^2\text{)},$$

что удовлетворяет условию $P_y \leq P_{y \text{ max}}$.

В результате расчета получены основные конструктивные данные для изготовления ЛЭМД и батареи ЕНЭ, удовлетворяющей заданным требованиям.

5.2. Определение емкости и числа гарантированных разрядных циклов конденсаторной батареи

В связи с большими допустимыми отклонениями по емкости электролитических конденсаторов (до +50%) для вновь изготовленных и с выходом из строя отдельных конденсаторов при длительной эксплуатации номинал емкости конденсатора определяется методом обсчета экспоненты разряда на известное сопротивление [102].

В этом случае разряд описывается формулой:

$$u_C = U_o \cdot e^{-t/\tau}, \quad (5.18)$$

где u_C и U_o – текущее и начальное напряжения на конденсаторах соответственно; $\tau = R_o \cdot C$ – постоянная времени, где R_o – балластное сопротивление. После несложных преобразований выражение (5.18) приведем к виду, позволяющему найти емкость:

$$C = \frac{t}{R_o \cdot \ln(U_o/u_C)}. \quad (5.19)$$

Используя экспоненту разряда и зная U_o , можно легко определить u_C для любого удобного значения времени t . Подставив все известные значения в (5.19), можно определить емкость батареи конденсаторов с достаточной для практики точностью. Вычисления еще более упрощаются, если учесть, что в момент $t=\tau$ имеет место соотношение $U_o/u_C = 2,718$. Используя последнее, по экспоненте разряда легко определить τ , а с ней и емкость конденсаторной батареи. Так как обычно эксплуатируемое зарядное напряжение меньше номинального, то число гарантированных разрядных циклов возрастает и

может быть приближенно подсчитано по формуле [65]:

$$N = \frac{N_H}{\sum p_i \left(\frac{E_{P,i}}{E_C} \right)^g}, \quad (5.20)$$

где $E_{P,i}$ – рабочая энергия ЕНЭ, необходимая для выполнения одной из заданных технологических операций; p_i – доля разрядов, произведенных при энергии $E_{P,i}$; $g=(2...3)$ – эмпирический коэффициент, зависящий от режима работы ЕНЭ; N_H – гарантированное число разрядов ЕНЭ при номинальной энергии.

Пример. Дана конденсаторная батарея, у которой гарантированное число разрядов $N_H = 20000$. Номинальное напряжение заряда батареи 300 В. Предполагается выполнять технологические операции маркирования и клеймения от данного ЕНЭ со следующим процентным распределением энергии:

70% разрядов при энергии разряда, равной $E_{P,1} = \frac{1}{3} \cdot E_{C,max}$,

20% – при $E_{P,2} = \frac{1}{2} \cdot E_{C,max}$,

10% – при максимальной допустимой энергии разряда $E_{P,3} = E_{C,max}$.

Определить число гарантированных разрядных циклов конденсаторной батареи. Для определения емкости батареи воспользуемся методом обсчета экспоненты, учитывая полученные экспериментальные данные: начальное напряжение заряда батареи равнялось 280 В, после разряда в течение 88 с на балластный резистор сопротивлением 40 кОм напряжение на ЕНЭ понизилось до 100 В.

Решение. Предварительно определим емкость батареи по формуле (5.19):

$$C = \frac{88}{40000 \cdot \ln(280/100)} = 2,137 \cdot 10^{-3} \text{ Ф},$$

тогда максимальная энергия заряда батареи будет равна:

$$E_{C,max} = \frac{C \cdot U_{max}^2}{2} = \frac{2,137 \cdot 10^{-3} \cdot 300^2}{2} = 96,16 \text{ Дж}.$$

Согласно (5.20) определяем число гарантированных разрядных циклов ЕНЭ:

$$N = \frac{20000}{0,7 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^3 + 0,2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 + 0,1 \cdot \left(\frac{1}{1}\right)^3} = 132700 \text{ разрядов}.$$

5.3. Экономическая эффективность применения СЭМИС в операциях маркирования и клеймения

Основными показателями экономической эффективности использования результатов НИР, новой техники в общем случае служат улучшение качества продукции, повышение производительности труда, получаемый годовой эффект. Годовой эффект представляет собой суммарную экономию всех производственных ресурсов, которую получают предприятия в результате внедрения новой разработки.

Темпы и объемы создания устройств маркирования и клеймения на основе СЭМИС должны рассматриваться, прежде всего, с позиций обеспечения наибольшего вклада в решение существующих проблем и повышения эффективности капитальных вложений в новую технику за счет улучшения всех показателей работы, их удешевления, ускорения оборотных средств, сокращения затрат на ремонт и эксплуатацию, снижения материалоемкости, а также роста электровооруженности работников и облегчения их труда, воздействия новой техники и технологии на повышение квалификации и подъем культурного и материального уровня трудящихся.

Применение УМК на базе СЭМИС дает несколько экономических эффектов: снижение капиталовложений; снижение издержек на энергоресурсы; снижение себестоимости работ. Одним из показателей экономичности конструкции ударных устройств является металлоемкость. Металлоемкости известных конструкций устройств маркирования и клеймения ударным методом различных приводов приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Тип привода устройства маркирования	Металлоемкость, кг/Дж
1. Пневмопривод	0,5-1,0
2. Гидропривод	0,3-0,6
3. СЭМИС	0,07-0,1



Рис. 5.1. Устройство маркирования и клеймения типа УМК-10

Произведем расчет стоимости, цены и срока окупаемости на примере устройства маркирования и клеймения типа УМК-10, изготовленного и внедренного на ряде предприятий (рис. 5.1). Устройство УМК-10 разработано для выполнения технологических операций маркирования и клеймения бирок, шильдиков приборов и выводов радиоэлектронной аппаратуры.

Простота конструкции, широкие технологические возможности в повышении производительности, надежность, экономичность, регулирование в широких пределах энергии удара, высокая стабильность энергии воздействия, возможность автоматизации, легкость в управлении и исключение перегрузок, высокая технологическая универсальность за счет использования быстросъемных штампов, низкая стоимость выгодно отличают УМК-10 от других устройств, используемых для технологических операций маркирования и клеймения.

Основные технические характеристики и параметры УМК-10 представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Технические характеристики	Значение
1. Источник питания	сеть 220 В, 50 Гц
2. Средняя потребляемая мощность при частоте рабочих ходов 30 в минуту максимальной энергии удара	22 Вт
3. Максимальная энергия удара	12 Дж
4. Диапазон регулирования энергии удара	0,28-12 Дж
5. Масса устройства (не более)	5,0 кг
6. Максимальная удельная энергия удара	2,45 Дж/кг
7. Диапазон регулирования величины рабочего хода	1,0-15 мм

Применение УМК-10 в операциях маркирования и клеймения позволяет эффективно заменить тяжелый ручной труд машинным, повысить качество выполнения операций маркирования и уменьшить брак за счет обеспечения высокой точности и стабильности энергии воздействия, повысить культуру производства.

На рис. 5.2 показано устройство маркирования и клеймения и его рабочее место.

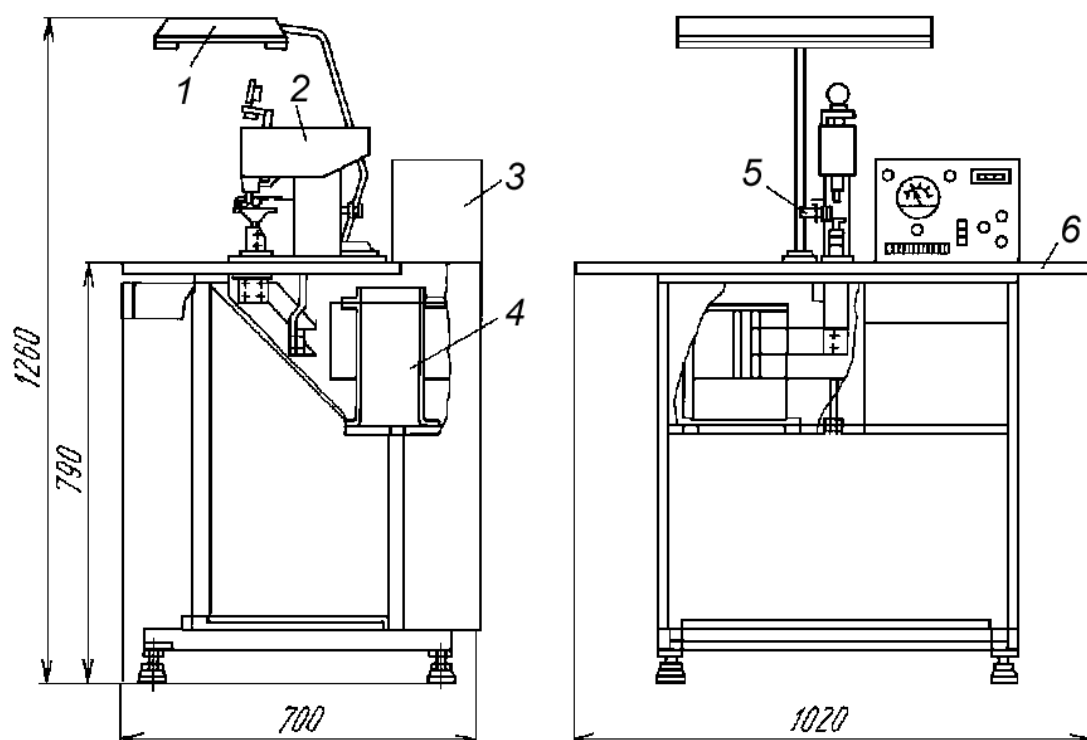


Рис. 5.2. Устройство маркирования и клеймения и его рабочее место:
1- светильник; 2- СЭМИС; 3- блок питания и управления УМК;
4- вспомогательное оборудование; 5- выдвижная наковальня; 6- рабочий стол

Соотношения стоимостей отдельных узлов устройства УМК-10 приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Наименование узла	Стоимость
1. ЛЭМД	65%
2. Конденсаторная батарея	15%
3. Система питания (силовая часть)	10%
4. Система заряда и управления	10%

Следует учесть, что стоимость ЛЭМД увеличивается пропорционально радиусу якоря, следовательно, пропорционально требуемой энергии удара (согласно методике расчета 5.1.), при этом стоимости систем питания, заряда и управления меняются незначительно. Сильная зависимость веса и стоимости ЛЭМД от радиуса якоря заставляет максимально использовать близкие к предельным удельные характеристики привода (Дж/кг).

Рассчитаем на примере устройства УМК-10 цену этого изделия, себестоимость и графически определим точку безубыточности производства устройства УМК-10, а также то, на какой год (месяц) она приходится.

Исходные данные для расчета

Предприятие планирует начать выпуск устройств маркирования и клеймения типа УМК-10 в соответствии с планом: в первый год - 120, во второй год - 250 и в третий год - 400 штук по расчетной цене за одно изделие, при этом плата за аренду офиса и мастерской составит 7,4 тыс.руб./месяц, плата за рекламу товара и маркетинговые исследования рынка – 30 тыс.руб./год, зарплата директору и специалистам (3 человека) – 25000 руб./месяц. Стоимость материалов и комплектующих на изготовление одного устройства, а также трудоемкость изготовления одного изделия рассчитывается в нормо-часах (в табл. 5.4 указана при стоимости 52 руб. за один нормо-час).

Таблица 5.4

Смета статей затрат

№	Наименование статьи затрат	Сумма, руб.	Примечание
1	Стоимость материалов и комплектующих, C_{MO}	3400	
2	Трудоемкость работ в изготовлении (74 нормо-часа) Основная заработная плата, Z_O	3848	1н/ч=52руб.
3	Дополнительная заработная плата, Z_D	423,3	
4	Стоимость К.Д. и безопасного техпроцесса C_K	696	
5	Отчисления на соц. страхование (17,7% от Z_O), O_{CC}	756,02	
6	Отчисления в дорожный фонд (1% от C_{MO})	34,0	
7	Прочие прямые расходы 5% от C_{MO}	170	
8	Накладные расходы (52% от $C_{MO} + C_K$)	2129,9	
9	Отчисления на амортизацию и др. (36% от Z_O)	1520,58	
10	Себестоимость изделия, C	12977,8	
11	Планируемая прибыль (25% от C)	3244,45	
12	Цена изделия, $Ц$	16222,25	
13	Общая цена изделия с учетом НДС 18%	19142,3	

Составим смету затрат для изготовления опытного образца устройства УМК-10. Используя метод калькуляции, рассчитаем себестоимость изделия – устройства типа УМК-10.

Полная себестоимость продукции рассчитывается в виде суммы:

$$C = C_{MO} + C_{MB} + C_{П} + P_{Tr} + A + Э + Z_O + Z_D + O_{CC} + P, \quad (5.21)$$

где C_{MO} - стоимость основных материалов; C_{MB} - стоимость вспомогательных материалов; $C_{П}$ - стоимость полуфабрикатов; P_{Tr} - транспортные расходы; A - амортизационные отчисления; $Э$ - стоимость энергии технологической; Z_O - зарплата основная; Z_D - зарплата дополнительная; O_{CC} - отчисления на социальное страхование; P - цеховые, заводские, внепроизводственные расходы, в том числе расходы на реализацию продукции.

Расход денежных средств будет производиться на оплату аренды, выплату заработной платы, оплату за рекламу товара, а также на дополнительные расходы, связанные с организацией и осуществлением деятельности предприятия (оплата за выполненные работы по договору, в том числе «Подрядчикам»), согласно смете затрат.

Определим рентабельность производства УМК-10 по формуле:

$$R = \frac{(\Pi - C + C_k) \cdot 100\%}{C}, \quad (5.22)$$

$$R = \frac{(16222 - 12977 + 696) \cdot 100\%}{12977} = 30,4\% .$$

Согласно выполненным расчетам цены, заработной платы и себестоимости к *переменным расходам* относятся стоимость материалов и комплектующих, стоимость разработки документации, транспортные накладные, а к *постоянным затратам* – все остальные платы. Сведем все данные в табл. 5.5.

Таблица 5.5

№	Показатели	Начальное состояние	По окончании			Примечание
			I - й год	II - й год	III - й год	
1	Объем выпускаемых изделий в год	-	120	250	400	
2	Цена одного изделия, руб.	-	16222,3	17520	18921,6	Ежегодный рост на 8%
3	Выручка, руб.	-	1946664	4380000	7568640	
4	Постоянные затраты, руб.	$418,8 \cdot 10^3$	$502,6 \cdot 10^3$	$603,1 \cdot 10^3$	$723,7 \cdot 10^3$	Ежегодный рост на 20%
5	Переменные затраты, руб.	$195,4 \cdot 10^3$	$411,4 \cdot 10^3$	$565,6 \cdot 10^3$		
6	Суммарные затраты, руб.	$614,2 \cdot 10^3$	$913,9 \cdot 10^3$	$1168,7 \cdot 10^3$		Фактическая себестоимость

По данным табл. 5.5 строим график определения точки (зоны) безубыточности производства товара – устройства УМК-10, выпускаемых фирмой, представлен на рис. 5.3.

Точка безубыточности производства товара (на графике соответствует точке пересечения двух кривых 1 и 2) на примере изделия УМК-10 согласно построенному графику соответствует объему выпуска 50 штук, а по плану первого года выпуска – 120 шт., следовательно, через 5 месяцев выпуска данного товара по ранее намеченному плану фирма войдет в зону «безубыточного производства» товара.

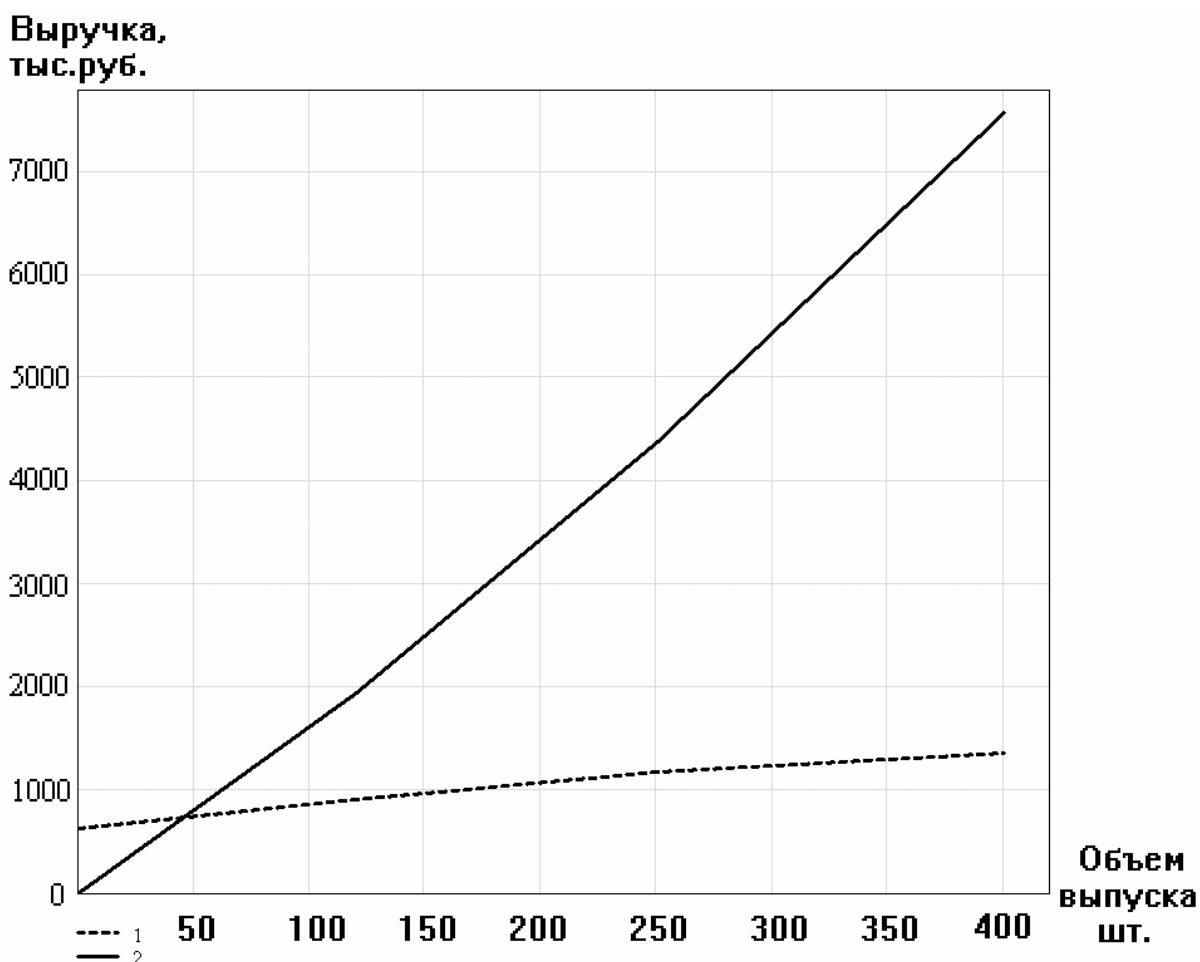


Рис. 5.3. График определения точки (зоны) безубыточности производства устройства УМК-10: *кривая 1* – изменение суммарной себестоимости по годам выпуска товара; *кривая 2* – изменение суммарной выручки по годам выпуска товара

На основании выполненных расчетов и определения себестоимости и цены товара УМК-10, а также учитывая средний уровень рентабельности устройства и очень малый срок окупаемости – около 5 месяцев, предлагаемый товар будет пользоваться хорошим спросом у потребителей, что свидетельствует о его конкурентоспособности на рынке.

Точка безубыточной деятельности предприятия, взявшего на себя ответственность при производстве данного вида товара, приходится на первую половину 1-го года его деятельности, а точнее, через 5 месяцев работы, при условии выполнения намеченного фирмой плана по выпуску изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
3. Садовский В.Н. Принцип системности, системный подход и общая теория систем//Системные исследования. – М.: Наука, 1988. – 305 с.
4. Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: Дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 492 с.
5. Туровский П.С., Фролов А.В. Расчет, конструирование и создание электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 129 с.
6. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г. и др. Электропривод с линейным электромагнитными двигателями. – Новосибирск: Наука, 1981. – 159 с.
7. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
8. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
9. Малов А.Т., Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г. Электромагнитные молоты. – Новосибирск: Наука, 1979. – 269 с.
10. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс: Учебник для вузов.– 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
11. Егоров А.А., Вырыханов Д.А., Мошкин В.И. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в силовых электромагнитных системах // Интеллектуальный потенциал высшей школы – железнодорожному транспорту: Сб. научн. статей: В 2 т. – Саратов: Научная книга, 2006. –Т. 1.– С. 39-42.
12. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 338 с.
13. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд. - Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 520 с.
14. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
15. Никитенко А.Г., Пеккер И.И. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
16. Пеккер И.И., Щучинский С.Х. Косвенный экспериментальный метод определения динамических характеристик линейного электромагнитного привода //Известия вузов. Электромеханика. – 1969.– №11. – С. 1255 – 1258.
17. Перьев А.А. Совершенствование методов и средств измерений энергетических параметров электромагнитных машин ударного действия //Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С. 13-25.

18. Петриковский Е.Л., В.Ф. Красников. Маркирование изделий в радио- и электронной промышленности. – М.: Энергия, 1974. – 184 с.
19. Милов В.А. Устройства для контроля прочности. – М.: Машиностроение, 1976. – 127 с.
20. Манжосов В.К., Лукутина Н.О. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Изд-во «ИЛИМ», 1985. – 120 с.
21. Головин В.А., Ракошиц Г.С., Навроцкий А.Г. Технология и оборудование холодной штамповки. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
22. Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н. и др. Источники вторичного электропитания / Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983. – 360 с.
23. Карпенко Л.Н. Быстродействующие электродинамические отключающие устройства. – М.: Энергия, 1973. – 158 с.
24. Михайлов О.П., Рогачев Э.Б., Ивенский Ю.Н. Электромагнитные и магнитные устройства в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.
25. Бреполь Э. Теория и практика ювелирного дела/ Под ред. Л.А. Гугова и Г.Т. Оболдуева.– Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.
26. Тарасов В.А. Методы анализа в технологии машиностроения. Аналитическое моделирование динамических процессов обработки материалов.– М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1996. – 187 с.
27. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах.– М.: ВШ, 1989. – 274 с.
28. Шрайбман И.М. Автоматизация сборочно-монтажных процессов с использованием промышленных роботов в приборостроении.– М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1983. – Вып.4.– 64 с.
29. Самецкий Р.И., Смоленцев Г.П. Маркирование деталей электроискровым методом. – СПб.: НИИКИ ОЭП, 2000. – 60 с.
30. Электрохимическая обработка металлов/Под ред. И.И. Мороза. – М.: Машиностроение, 1969. – 186 с.
31. Бартл Д., Мудрох О. Технология химической и электрохимической обработки поверхности металлов. – М.: Машгиз, 1980. – 124 с.
32. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Парогазовый разряд между струйным электролитическим и металлическим электродами в технологических процессах. – Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989. – 132 с.
33. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.
34. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. – М.: ВШ, 1980. – 364 с.
35. Стоколов В.Е., Усышкин Г.С., Степанов В.М. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1981. – 304 с.
36. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 128с.
37. Бекренев Н.В. Высокоэффективные процессы обработки материалов и нанесения покрытий концентрированными потоками энергии: Учебное пособие /Под ред. проф. В.Н. Лясникова.– Саратов: СГТУ, 2003.– Ч.1. – 84 с.

38. Бекренев Н.В., Лясникова А.В., Трофимов Д.В. Высокоэффективные процессы обработки материалов и нанесения покрытий концентрированными потоками энергии: Учебное пособие / Под ред. проф. В.Н. Лясникова. – Саратов: СГТУ, 2004. – Ч.2. – 117 с.
39. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Новые принципы и пути повышения эффективности редкоударных электромагнитных машин. – Новосибирск, 1995. – С. 35-39.
40. Угаров Г.Г., В.Ю. Нейман. Энергопреобразование в импульсных линейных электромагнитных двигателях при малых рабочих воздушных зазорах //Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Строительные материалы и технология».– Новосибирск, 1997.– С. 78-82.
41. Угаров Г.Г., Ямпольский Ю.Г., Денисенко А.А. Анализ основных типов силовых линейных импульсных электрических двигателей//Электротехника. – 1995. – №12. – С. 35-43.
42. Ямпольский Ю.Г. О проектировании оптимальных линейных импульсных электродинамических двигателей возвратно-поступательного движения// Электротехника.– 1990. – №2. – С. 51-55.
43. Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. – М.: ВШ, 1982. – 264 с.
44. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студентов вузов. – 3-е изд. – М.: ВШ, 1986. – 352 с.
45. Михайлов О.П., Рогачев Э.Б., Ивенский Ю.Н. и др. Электромагнитные и магнитные устройства в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.
46. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. /Под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 3. – 384 с.
47. Памятных Е.А., Туров Е.А. Основы электродинамики материальных сред в переменных и неоднородных полях: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука, 2000. – 421 с.
48. Барабашук В.И. Планирование эксперимента в технике /В.И. Барабашук. – Киев: Наукова думка, 1984. – 200 с.
49. Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента /Под ред. В.Г. Воронова. – Харьков: Вища шк.; Изд-во при Харьковском ун-те, 1986. – 240 с.
50. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. - М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
51. Хензель А., Шпитель Т. Расчет силовых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справочник /Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
52. Улановский О.О. Прибор, механизм, приспособление... - Л.: Лениздат, 1980. – 164 с.
53. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. 2-е изд.– М.: ВШ, 1986. – 351 с.

54. Ефимов И.Г., Соловьев А.В., Викторов О.А. Линейный электромагнитный привод. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990. – 212 с.
55. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет/ Под ред. А.В. Коваля. – М.: Сов. радио, 1977. – 368 с.
56. Афонин А.А., Билозор Р.Р., Гребеников В.В. и др. Электромагнитный привод робототехнических систем. – Киев: Наукова думка, 1986. – 272 с.
57. Андреева Е.Г., Шамец С.П., Колмогоров Д.В. Конечно-элементный анализ стационарных магнитных полей с помощью программного пакета ANSYS: Учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 92 с.
58. Андреева Е.Г., Ковалев В.З. Математическое моделирование электротехнических комплексов /Под общ. ред. Ю.З. Ковалева. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. – 172 с.
59. Бахвалов Ю.А., Бондаренко А.И. Решение внешних краевых задач при расчете электромагнитных полей методом конечных элементов // Известия вузов. Электромеханика.- 1983. – №6. – С. 5-10.
60. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971.– 1032 с.
61. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 616 с.
62. Белов А.Б. Установки контактной сварки. – Л.: Энергоиздат, 1984. – 118 с.
63. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
64. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия, 1991.– 206 с.
65. Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
66. Стародубов В.А. Малогабаритная магнитно-импульсная установка //Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 12.– С.25-26.
67. Стародубов В.А. Расчет параметров магнитно-импульсной системы //Электричество. – 1994.– №1.– С. 54-57.
68. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.- Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 256 с.
69. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий //Электротехника.– 2003.– №9.– С. 25-30.
70. Кныш В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопителей конденсаторов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 160 с.
71. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. - М.: ВШ, 1978. – 231 с.
72. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. – М.: Госэнергоиздат, 1936. – Ч. II. – 211 с.
73. Кухаркин Е.С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика /Под ред. П.А. Ионкина. – М.: ВШ, 1982. – 520 с.
74. Егоров А.А., Угаров Г.Г., Вырыханов Д.А. Влияние предыстории импульсного намагничивания магнитной системы линейного электромагнитного двигателя на его энергетические показатели //Известия вузов. Электромеханика. – 2007.– №3. – С. 16-19.

75. Егоров А.А., Выриханов Д.А. Экспериментальное исследование линейного электромагнитного двигателя при питании от емкостного накопителя //Электротехнические комплексы и силовая электроника: Межвузовский научный сборник. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 4-8.
76. Егоров А.А., Выриханов Д.А. Способ повышения стабильности энергии удара в линейном электромагнитном двигателе // Проблемы электроэнергетики: Межвузовский научный сборник. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 133-138.
77. Булатов О.Г., Иванов В.С., Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с.
78. Буль Б.К. Основы теории расчета магнитных цепей. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 464 с.
79. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 57 с.
80. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Повышение удельных силовых показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами /Под. общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсные линейные электромагнитные машины: Сб. науч. тр. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 50 -56.
81. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов. –М.-Л.: Энергия, 1965. - 167 с.
82. Parker J. V., Batteh J. H., Greig J. R., Keefer I. R. Electrodynamic launchers research and development, Science Applications International Corp., McLean, VA (United States). Foreign Applied Sciences Assessment Center, 1994. - 315 p.
83. Buschow K. H. J., de Boer F. R. Physics of Magnetism and Magnetic Materials, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2004. - 182 p.
84. Thom, K., J. Norwood. Theory of an electromagnetic mass accelerator for achieving hypervelocity's. Hampton, VA: NASA Langley Research Center, June, 1961. P. 94-115.
85. Zabar Z., Lu X.N., Birenbaum L., Levi E., He J.L. Linear Induction Launcher, IEEE Transaction on Magnetic. 1984. Vol. MAG-20, №2. P239-242.
86. Turman B.N., Marder B.M., Rohwein G.J., The pulsed linear induction motor. Concept for high-speed trains, / B. N. Turman, B. M. Marder, G. J. Rohwein, D. P. Aeschliman, I B. Kelley, M. Cowan, R. M. Zimmerman /, Pulsed Power Sciences Center, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, 42 p.
87. Лоос А.В., Лукутин А.В., Сараев Ю.Н. Источники питания для импульсных электротехнических процессов. – Томск: Изд-во ТПИ, 1998. – 159 с.
88. Бузов А.Л., Сподобаев Ю.М. Электромагнитная экология. Основные понятия и нормативная база. – М.: Радио и связь, 1999. – 78 с.
89. Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья //Успехи физических наук. – М.: Наука, 1998. – Т. 168. – №7. – С. 767-791.

90. Деденко Л. Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. - М.: Изд-во МГУ, 1977. – 240 с.
91. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с регулируемыми выходными параметрами Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 189 с.
92. Yan M., Udpa S., Mandayam S., Sun Z., Sacks P., Lord W. Solution of inverse problems in electromagnetic NDE using finite element methods. IEEE Transactions on Magnetics, vol.34, No.5, 1998. – P. 2924-2927.
93. Ивашин В.В., Чуркин И.М. Конденсаторные источники питания импульсных электромеханических преобразователей энергии // Системы электропитания потребителей импульсной мощности: Сб. статей. – М.: Энергия, 1976. – С. 23-29.
94. Гогичайшвили П.Ф. Подстанции без выключателей на высшем напряжении. – М.: Высшая школа, 1965. – 200 с.
95. Проектирование датчиков для измерения механических величин /Под общ. ред. Е.П.Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
96. Егоров А.А. Методика определения оптимальных параметров емкостного накопителя для питания импульсного линейного электромагнитного двигателя // Анализ, синтез и управление в сложных системах: Сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2006.– С. 84-87.
97. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах //Вестник Курганского гос. университета. Серия «Технические науки». Вып.2. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005.– С. 239-240.
98. Вырыханов Д.А., Егоров А.А. Оценка энергетических показателей ЛЭМД // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб.– Саратов: СГТУ, 2005.– С. 112-118.
99. Егоров А.А., Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г. Моделирование конструкции магнитной системы линейного электромагнитного двигателя для технологических операций маркирования и клеймения // Вісник ХНТУСГ ім П.Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2005. – Вип. 37. – Т.1. – С. 171-175.
100. Егоров А.А., Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г. Конструкция магнитной системы линейного электромагнитного двигателя для безударного маркирования и клеймения деталей и изделий //Актуальные проблемы энергосберегающих технологий: труды Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – С. 208-211.
101. Егоров А.А., Вырыханов Д.А. Оптимизация режима питания импульсного линейного электромагнитного двигателя от емкостного накопителя // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 128-133.
102. Козлов В.И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм /Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. – М.: МГУ, 1987. - 270 с.

103. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Вестник СГТУ. – 2006. – №1(10). – Вып.1. – С. 39-44.
104. Егоров А.А., Вырыханов Д.А., Мошкин В.И. Анализ процесса установления стабилизации разрядных импульсов в силовых электромагнитных системах // Интеллектуальный потенциал высшей школы – железнодорожному транспорту: Сб. науч. статей: В 2 т. – Саратов: Научная книга, 2006. – Т. 1. – С. 39-42.
105. Вырыханов Д.А., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин // Вестник СГТУ. – 2006. – №3 (15). – Вып.2. – С. 78-83.
106. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
107. Meeker D. C. , Maslen E. H., Ritter R. C., Creighton F. M. Optimal realization of arbitrary forces in a magnetic stereotaxis system in programme Femm. // IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 2, pp. 320-328, March 1996.
108. Meeker D. C., Maslen E. H., Ritter R. C. A Windows finite element solver for low frequency 2D and axisymmetric magnetic problems with graphical pre- and post-processors . – TSS (UK) Ltd.
109. Yan M. Solution of inverse problems in electromagnetic NDE using finite element methods / M.Yan, S.Udpa, S.Mandayam, Z.Sun, P.Sacks, W.Lord // IEEE Transactions on Magnetics, vol.34, No.5, 1998. P.2924-2927.
110. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2003.- 249 с.
111. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Руденко Н.С. К методике расчета электромагнитных ударных узлов методом подобия // В сб.: Электрические ударные машины возвратно-поступательного движения. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1969. – С. 92-97.
112. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высшая школа, 1966. – 310 с.
113. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 447с.
114. Сливинская А.Г. Расчет электромагнитов постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1968. - 224 с.
115. Пат. № 2099175. Электромагнитный ударный инструмент / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. Оpubл. в Б.И. – 1997. – №34.
116. Пат. № 2065360. Устройство для клеймения ювелирных изделий и инструмента / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. Оpubл. в Б.И.– 1996.– №32.
117. Пат. № 2065659. Линейный электромагнитный двигатель с двумя рабочими зазорами, комбинированным якорем и ферромагнитным

- направляющим корпусом / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман. Оpubл. в Б.И.– 1996.– №32.
118. А.с. № 985892 (СССР). Способ возбуждения индукционно-динамического двигателя возвратно-поступательного движения / В.В. Ивашин, И.А. Милорадов, Ю.П. Петунин. Оpubл. в Б.И.– 1982.– № 48.
119. А.с. № 877728 (СССР). Электрический двигатель возвратно-поступательного движения /В.В. Ивашин, И.А. Милорадов, Ю.П. Петунин. Оpubл. в Б.И.– 1981.– №40.
120. А.с. № 541530 (СССР). Устройство для клеймения изделий / А.А. Дерябин, В. С. Кувшинов. Оpubл. в Б.И.– 1977.– №7.
121. А.с. № 613837 Устройство для клеймения изделий / В.Х. Плетень, А. Н. Кателло, В. С. Кувшинов, М. Б. Гальперт. Оpubл. в Б.И.– 1978.– №19.
122. А.с. № 747566 Устройство для клеймения / А.Н. Кателло, В.С. Кувшинов, В. Х. Плетень. Оpubл. в Б.И.– 1978.– №24.
123. Пат. № 2175284. Устройство для маркирования деталей /А.В. Качанов. Оpubл. в Б.И. – 2001. – №3.
124. А.с. № 814513 Устройство для клеймения /В.Х. Плетень, А.Н. Кателло, В.С. Кувшинов. Оpubл. в Б.И. – 1981. – №53.
125. Пат. 2077764. Устройство для клеймения проката в торец /Р.Н. Яхрин. Оpubл. в Б.И. – 1997.– №32.
126. Пат. РФ № 2098259. Способ упрочнения поверхности деталей машин и инструментов ударными импульсами. Технология статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. Оpubл. в Б.И.– 1997.– №34.
127. Пат. РФ № 2090342. Генератор механических импульсов (гидропневмоударник) /А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев. Оpubл. в Б.И. – 1997. – №34.

Научное издание

Егоров Андрей Александрович
Мошкин Владимир Иванович
Угаров Геннадий Григорьевич

**ИМПУЛЬСНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД
УСТРОЙСТВ МАРКИРОВАНИЯ И КЛЕЙМЕНИЯ
МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ**

МОНОГРАФИЯ

Редактор Н.Л. Борисова

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. №1
Печать трафаретная	Усл. печ.л. 8,5	Уч.- изд.л. 8,5
Заказ	Тираж 300	Цена свободная

РИЦ Курганского государственного университета.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.