

ГОУ ВПО "ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

На правах рукописи

ЯКОВЛЕВ Дмитрий Алексеевич

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ
ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Ивашин В.В.

Тольятти 2007

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Сейсмоисточники для возбуждения сейсмических волн в водной среде.....	11
1.1. Специфика водных сейсмоисточников	11
1.2. Особенности сейсмоисточников-пневмопушек	14
1.3. Возможности и проблемы использования опыта наземной сейсморазведки.....	17
Выводы	17
ГЛАВА 2. Водный поверхностный сейсмоисточник с электромагнитным приводом.....	19
2.1. Конструктивная схема.....	19
2.1.1. Импульсный электромагнитный наземный сейсмоисточник.	19
2.1.2. Импульсный электромагнитный водный сейсмоисточник.	20
2.2. Электромагнит силового привода	23
2.2.1. Обоснование выбора типа силового привода.	23
2.2.2. Режим энергопреобразования с постоянством потокосцепления.....	25
2.2.3. Анализ электромагнита в программном комплексе Elcut 5.1.	31
2.2.4. Методика экспериментального исследования электромагнита.	36
2.3. Схемы питания	39
2.3.1. Обоснование выбора схемы заряда емкостного накопителя.	40
2.3.2. Особенности схемы электропитания водного сейсмоисточника с электромагнитным приводом.	43
2.3.3. Выбор элементов и варианты схем.....	55
2.4. Экологический аспект водной сейсморазведки.....	61
Выводы	64
ГЛАВА 3. Режимы работы и математическая модель сейсмоисточника	65
3.1. Режимы работы.....	65
3.1.1. Режим давления на плиту-антенну.	66

3.1.2. Режим удара.	68
3.2. Математическая модель импульсного водного сейсмоисточника	80
3.2.1. Применение метода электромеханических аналогий.	80
3.2.2. Полная механическая цепь и её электрическая цепь-аналог.....	80
3.2.3. Электрические цепи для различных интервалов линейности.	83
3.2.4. Составление систем уравнений.	85
3.2.5. Решение систем уравнений и его результаты.	91
3.2.6. К вопросу о водной среде как о нагрузке для водного сейсмоисточника.	99
Выводы	102
ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования и перспективные направления совершенствования водного сейсмоисточника ("Аква")	104
4.1. Лабораторные испытания	104
4.1.1. Исследование в режиме заторможенного якоря.	105
4.1.2. Исследование режима давления.	115
4.1.3. Исследование ударного режима.	129
4.1.4. Оценка эффективности режимов.	139
4.1.5. Некоторые данные полевых испытаний.	140
4.2. Сейсмические испытания.....	144
4.2.1. Проведённые работы.	145
4.2.2. Обработка полученных материалов.	148
4.2.3. Выводы по результатам сейсмических испытаний.	148
4.3. Перспективные конструктивные решения сейсмоисточника.....	151
4.3.1. Сейсмоисточник с непосредственным взаимодействием ударника с водой.	151
4.3.2. Наземно-водный сейсмоисточник.	153
Выводы	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
ЛИТЕРАТУРА.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт внедрения НИР(ОКР)	165

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт внедрения в учебный процесс	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Конструкция сейсмоисточника "Аква"	167
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Листинг программы для расчёта процессов в механической системе водного сейсмоисточника.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Программа лабораторных испытаний сейсмоисточника "Аква"	175

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Требования создания надежной топливно – сырьевой базы, удовлетворяющей потребности промышленности, приводят к тому, что геологоразведочные работы по открытию новых месторождений полезных ископаемых должны проводиться во все возрастающих объемах. Важная роль в этих работах принадлежит сейсморазведке – основному геофизическому методу изучения строения недр [1, с. 404], базирующемуся на искусственном возбуждении и регистрации сейсмических волн. Материалы сейсморазведки служат основой для направления и проведения буровых поисково-разведочных работ. Поэтому поиски путей повышения геологической и экономической эффективности сейсмических методов разведки имеют высокую прикладную и научную значимость.

Важной частью разведочной геофизики является водная сейсморазведка. Причём в настоящее время наблюдается рост её значения, связанный с необходимостью расширения зон поиска запасов нефти и развитием разведочных методов. Так, например, в программе геолого-геофизических работ на акваториях только Дальневосточных и Северо-Восточных морей РФ на 1998-2007 г.г. было запланировано исследование 54 335 погонных километров или 41 500 км² [2].

В отличие от разведки на шельфах морей и океанов, разведка на мелководье (реках, озёрах, водохранилищах) имеет значительно меньшее распространение. Возможно, сдерживающими факторами здесь являются:

- необходимость частой смены технологии возбуждения сигнала при работе на местностях со множественными малыми водоёмами;
- невозможность эффективной адаптации средств возбуждения сигналов глубоководной сейсморазведки к малой глубине.

В результате, при работе на континенте (например, на равнинах Западной и Восточной Сибири, в дельтах рек (например, Волги и Кубани), на мелководной части морей (например, Каспийского моря)), сейсмическое профилирование выполняется с пропуском водных участков, что неизбежно ведёт к потере и искажению важного сейсмического материала и к снижению производительности и эффективности проводимых работ.

Таким образом, экономическая и техническая эффективность водной сейсморазведки определяются, прежде всего, характеристиками средств возбуждения сигналов. В развитии этих средств водная среда оказала двойное влияние. С одной стороны, произошёл более ранний, по сравнению с наземными источниками, отказ от использования взрыва в водной среде. Эволюция средств возбуждения происходила быстрее [3, с. 304] и по иным путям, чем в наземной сейсморазведке. В результате, многообразные водные сейсмоисточники принципиально отличаются от сейсмоисточников наземных.

С другой стороны, наиболее распространённые типы водных сейсмоисточников имеют ряд недостатков, существенно ограничивающих

возможности их совершенствования и применения. Например, упомянутая ранее, сложность их использование на мелкоглубинных водоёмах.

Представляемая работа выполнена в направлении силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС) для возбуждения сейсмических сигналов с поверхности водоёмов. Указанный тип систем в наземной сейсморазведке используется с 90^х годов и получил широкое применение и развитие: найдены простые и надёжные конструктивные решения и разработаны методики проектирования таких сейсмоисточников. Однако применение в водной сейсморазведке имеющегося опыта создания наземных электромагнитных сейсмоисточников возможно только при всестороннем учёте особенностей водной нагрузки и условий эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость решения прикладных и научных задач по разработке новых вопросов, характерных только для работы на воде.

Цели и задачи исследования.

Целью работы является повышение эффективности и увеличение возможностей водной сейсморазведки за счёт совершенствования средств возбуждения сигнала применением линейного электромагнитного привода и поверхностным расположением водного сейсмоисточника.

Основными задачами исследования являются:

- 1) формулировка базовых свойств сейсмоисточника нового типа;
- 2) разработка конструктивной схемы сейсмоисточника и анализ особенностей его силового привода;
- 3) определение диапазонов значений параметров СЭМИС, обеспечивающих максимальную механическую энергию и КПД электромеханического преобразования;
- 4) формулировка технических требований и условий к системе электропитания и её разработка;
- 5) разработка математической модели и анализ возможностей режимов работы СЭМИС;
- 6) экспериментальные исследования опытного образца и определение перспективных направлений совершенствования водного сейсмоисточника.

Объект исследования – комплекс процессов характеризующих преобразование потребляемой электрической энергии в энергию импульсного механического воздействия на водную среду.

Предметом исследования является силовая электромагнитная импульсная система – водный сейсмоисточник, включающий в себя мощный емкостной накопитель энергии с системой заряда, импульсный электромагнитный привод с системой управления, специальную механическую систему для согласования с нагрузкой.

Методологическая и теоретическая основа исследования.

Основные положения теории и практики сейсморазведки рассмотрены в трудах М.И. Балашканда, Г.А. Гамбурцева, Л. Гелдарта, И.И. Гурвича, Майорова, В.В. Федынского, И.С. Чичинина, Р. Шериффа, М.Б. Шнеерсона и др.

Вопросы акустического и сейсмического излучения, а также взаимодействия излучателя со средой освещены в работах А.Г. Горшкова, Э.И. Григолюка, Л. Кампа, Г. Пейна, Я.Г. Поновко, Г.М. Свердлина, Е. Скучика, А.А. Харкевича, и других учёных.

Система электромеханических аналогий прорабатывалась в трудах И.А. Дружинского, И.М. Тетельбаума, Ф.М. Шлыкова и др.

Вопросы теории и практики линейного электромагнитного привода, электромеханического преобразования и методики проектирования невзрывных импульсных сейсмоисточников разработаны в трудах, Ю.А. Бару, Н.П. Бахарева, А.Г. Гурина, Н.А. Иванникова, В.В. Ивашина, И.А. Милорадова, Г.Г. Угарова и др.

Методы и средства исследования.

В диссертации использованы теоретические (проводимые аналитическими и численными методами) и экспериментальные, проводимые на действующем опытном образце сейсмоисточника, методы исследования. В частности, численные расчёты процессов динамики электромеханической системы сейсмоисточника проведены с использованием метода Рунге-Кутты, а уравнения составлены с использованием метода электромеханических аналогий; расчёт полей электромагнита проведён методом конечных элементов в программном комплексе Elcut 5.1.

Основой для реализации различных методов исследования являлись положения электротехники, теории линейного электропривода, электроники, механики.

Работоспособность положенных в основу работы идей и предположений подтверждена экспериментальными исследованиями.

Информационная база исследования.

В числе информационных источников диссертации использованы: а) научные источники в виде данных и сведений из книг, журнальных статей, научных докладов и отчётов, материалов научных конференций, семинаров, диссертационных работ; б) результаты собственных расчётов и проведённых экспериментов.

Научная новизна исследования.

1. Впервые разработано и научно обосновано предложение по созданию силовой электромагнитной импульсной системы для возбуждения сейсмического сигнала в водной среде.

2. Обоснована и создана новая конструкция электромеханической системы экспериментального образца сейсмоисточника, отличающаяся возможностью реализации различных режимов работы. Отличие новых, предложенных в диссертации режимов, состоит в изменении процесса энергопреобразования и излучения за счёт использования дополнительного упругого элемента и ударного взаимодействия.

3. Предложена методика получения составляющих энергетического баланса электромеханического преобразования на основе экспериментальных исследований.

4. Сделаны рекомендации по выбору параметров СЭМИС, обеспечивающих:

- максимальный КПД электромеханического преобразования и отдачу максимальной механической энергии (определяющиеся: зазором в электромагните, разбегом ударника, степенью форсировки);

- эффективное преобразование, накопление, передачу и использование электрической энергии (определяющиеся: схемотехникой и принципами работы системы электропитания).

5. Введено новое понятие "ключ заряда", развивающее метод электромеханических аналогий. Понятие "ключ заряда" используется для учёта связи состояния ключей механической схемы с состоянием зазоров в других частях этой же схемы.

Практическая значимость работы.

Полученные результаты по разработке водного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом могут применяться в сейсморазведке в районах с различными водоёмами. Полученные результаты исследования и рекомендации, высказанные в работе, могут быть использованы и для наземных сейсмоисточников, а также для перспективных сейсмоисточников-амфибий.

В результате выполнения работы был разработан, изготовлен и испытан в лабораторных и полевых условиях опытный образец импульсного водного сейсмоисточника "Аква" с электромагнитным приводом (Приложение 1). Сейсмоисточник "Аква" был создан по техническому заданию, разработанному совместно с ОАО "Тюменнефтегеофизика" на параметры, приведённые в таблице В.1.

Таблица В.1.

Параметры опытного образца сейсмоисточника "Аква"

Характеристика	Значение характеристик
1. Номинальное создаваемое электромагнитом усилие	$25 \cdot 10^4$ Н.
2. Масса пригруза	1300 кг.
3. Диаметр плиты-излучателя	0,8 м.
4. Зазор в электромагните	$(4..10) \cdot 10^{-3}$ м.
5. Зазор между ударником и плитой-излучателем	$(0..8) \cdot 10^{-3}$ м.
6. Масса сейсмоисточника (без плавсредства)	2500 кг.
7. Минимальный период повторения циклов работы	3 с.
8. Средняя потребляемая мощность	700 Вт.
9. Режимы работы:	а – упругий удар; б – упругое давление.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры

"Промышленная электроника" и электротехнического факультета Тольяттинского государственного университета; на научно-технической конференции "Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологий" (г. Тольятти, 2004 г.); на второй международной научно-технической конференции ELPIT – 2005 "Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов" (22-25 сентября 2005 г. ТолГУ).

Некоторые результаты работы были использованы на кафедре "Промышленная электроника" Тольяттинского государственного университета в спецкурсе лекций по импульсным электромеханическим преобразователям энергии, а также в курсовом и дипломном проектировании (Приложение 2).

Публикации. По результатам выполненных исследований было опубликовано 9 печатных работ из них 3 патента на изобретение.

Перечень положений, выносимых на защиту.

1. Возможно существенное увеличение эффективности водных сейсморазведочных работ за счёт разработки средств возбуждения сигналов новых типов.

2. Предложенная в работе конструктивная схема водного поверхностного импульсного сейсмоисточника обуславливает ряд принципиальных, существенных преимуществ перед наиболее распространёнными в настоящее время типами водных сейсмоисточников.

3. Короткоходовой электромагнит в качестве силового привода способен обеспечить приемлемую работу на нагрузку.

4. Предусмотренная в опытной установке возможность широкого изменения режимов работы электромеханической системы (давление, удар)

- подтвердила влияние типа режима, на такие показатели, как электромеханический КПД, и сейсмический результат (отклик нагрузки на воздействие);

- позволяет определять оптимальные параметры режима по указанным выше показателям;

- расширяет представления о сложном электромеханическом преобразовании (с ударами, упругими элементами).

5. Предложенная методика экспериментального исследования позволяет получить представление об энергетическом балансе в электромеханической системе, что является основой для оптимизации параметров и модернизации установки.

6. Анализ динамики импульсного сейсмоисточника для крайних состояний нагрузки (т.н. режимов "короткого замыкания" и "холостого хода") можно проводить по разработанной математической модели его электромеханической системы. Такой анализ позволяет исследовать влияние различных параметров на работу установки и делать некоторые рекомендации к проектированию установки типа "Аква".

7. Разработанная установка позволяет получить приемлемый сейсмический сигнал, способна работать на мелководье и имеет значительные

возможности совершенствования, в частности, сейсмоисточникам этого типа доступна работа в транзитных зонах.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 175 листов, 104 рисунка, 13 таблиц. Список использованной литературы включает 91 наименование. В общее количество листов входит 5 приложений на 11 листах.

Краткое описание структуры диссертационной работы.

Во введении выполнено обоснование актуальности темы работы, сформулирована цель и поставлены задачи работы, обоснована научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе выполнен обзор водных сейсмоисточников, указана их специфика. Рассмотрен наиболее распространённый тип водных сейсмоисточников – пневмопушки. Показаны их принципиальные ограничивающие и сдерживающие совершенствование особенности. Отмечена возможность и проблематика использования успешного опыта наземной сейсморазведки импульсными электромагнитными сейсмоисточниками в применении к водной сейсморазведке.

Во второй главе дано обоснование конструктивной схемы водного поверхностного импульсного сейсмоисточника и выбора типа его силового привода. Разобраны особенности работы электромагнитного привода: режим энергопреобразования с постоянством потокосцепления, электромеханические процессы на фронте импульса силы. Выполнен анализ распределения магнитного потока при изменении зазора и начальной энергии накопителя. Предложена методика экспериментального исследования энергетического баланса электромеханической системы. Обоснован выбор схемы заряда емкостного накопителя, проанализированы особенности её работы и сделаны рекомендации по выбору её элементов и вариантам схемотехнических решений. Рассмотрен экологический аспект водной сейсморазведки.

В третьей главе обосновано применение различных режимов работы электромеханической системы сейсмоисточника, дано их описание с использованием механических схем. Описана математическая модель электромеханической работы и приведены полученные с её помощью данные для крайних режимов работы на нагрузку. Отмечены отличия водной среды от грунта, как нагрузки в модели электромеханической системы сейсмоисточников.

В четвёртой главе приведены результаты лабораторных и сейсмических (полевых) испытаний, выполнен их анализ. На основании выполненной работы определены перспективные направления совершенствования конструкции сейсмоисточника и его электромагнитного привода.

ГЛАВА 1. СЕЙСМОИСТОЧНИКИ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ВОДНОЙ СРЕДЕ

1.1. Специфика водных сейсмоисточников

Повышение технической эффективности водной сейсморазведки и снижение затрат на её проведение во многом связаны с совершенствованием источников возбуждения сейсмических сигналов. На решение задачи совершенствования водных сейсмоисточников оказывает существенное влияние отличие водной сейсморазведки от наземной, заключающееся в том, что первичные колебания возбуждаются в водной среде.

Следствиями указанного отличия являются особенности водных сейсмических исследований:

1) многократно большее влияние сейсмозондействий на живые организмы в районе работ. В основном именно этот фактор обусловил запрет на применение в водной сейсморазведке взрывов, всё ещё применяющихся в наземной сейсморазведке;

2) доступность погружения источника в среду;

3) возможность использования текучести воды при возбуждении сигнала. Акустический сигнал в этом случае формируется на поверхности расширяющейся или схлопывающейся полости, которую можно получать различными способами (выбросом пара, воздуха, воды, продуктов взрыва, изменением объёма тел с оболочкой и др.).

4) повышенное требование безопасности по отношению к эксплуатирующему персоналу и плавсредствам;

5) повышенные требования обеспечения автономности (простоты, надёжности в эксплуатации, высокого использования энергии первичных источников).

К настоящему времени разработано множество видов невзрывных водных источников сейсмических сигналов и их модификаций, основанных на различных принципах действия. Свидетельством тому может служить большое количество авторских свидетельств и патентов, как отечественных, так и зарубежных авторов [4 – 8].

Согласно классификации водных сейсмических источников, основанной на различии по принципу возбуждения сейсмической энергии и предложенной в [9] выделим и охарактеризуем некоторые их типы.

Пневматические источники [например, 4] создают сейсмический импульс за счёт выброса в водную среду предварительно сжатого до определённого давления в определённом объёме газа. Распространённым названием таких источников является термин "пневмопушка". Так как они получили наибольшее практическое распространение, то их характеристика будет дана особо, ниже в подразделе 1.2.

Источники газовой детонации [например, 6, 7, 8] – работают с взрывом газовой смеси, однако в отличие от чисто взрывных источников взрыв происходит не в воде, а в специальных взрывных камерах, с последующим выбросом продуктов взрыва в окружающую среду. Такое разделение процесса на взрыв и выброс продуктов взрыва позволило уменьшить причиняемый природе вред и поднять КПД за счёт увеличения низкочастотной составляющей в излучаемом сигнале.

Однако многие недостатки, присущие взрывным источникам унаследованы источниками газовой детонации. Кроме того, взрывная камера работает в экстремальных условиях, поэтому является дорогим и сложным элементом системы.

Электроискровые источники – излучают при электрическом пробое промежутка между электродами, погруженными в жидкость за счёт т.н. эффекта Юткина. Так как пробой связан с протеканием через указанный промежуток большого электрического тока, то при этом происходит очень быстрый разогрев жидкости, приводящий к возникновению гидравлического удара в виде расширяющегося паровой полости.

Данный тип источников отличается простотой конструкции, относительной стабильностью акустических характеристик, малыми габаритами и весом. Основными недостатками, препятствующими их всеобъемлющему распространению, являются необходимость частой замены электродов, опасность работы с высокими электрическими напряжениями и током.

Источники имплозивного типа [например, 5] – основаны на схлопывании кавитационной полости, которая может быть образована различными способами. Основным достоинством источников данного типа является отсутствие пульсаций создаваемой в воде неоднородности.

Среди недостатков имплозивных источников отмечают [9, с. 30] невысокие амплитуду сигнала и акустический КПД, пониженную надёжность конструкции, затруднение синхронизации и создания стабильного сигнала.

Вибрационные источники [например, излучатель свип-сигналов ГИ-2 НИПИокеангеофизика 10] – создают непрерывный цуг волн с помощью вибрации. Данный тип сейсмоисточников предназначен для несколько иного метода приёма и обработки сигнала, чем описанные выше импульсные источники. С этим связаны основные достоинства и недостатки вибрационных источников. К первым относятся – получение больших амплитуд сигналов в диапазоне сейсмических волн, отсутствие вторичных пульсаций, возможность перенастройки на разные глубины. Недостатками являются усложнение методик регистрации и обработки сигнала, а также конструкции собственно источника сигнала и его систем управления.

Отдельно можно выделить группу водных импульсных сейсмоисточников обладающих одной общей особенностью: их работа не сопровождается созданием макронеоднородностей (полостей) в водной среде. Технические решения сейсмоисточников этой группы весьма разнообразны, что можно

увидеть, например, из обзора как отечественных [11 – 19] , так и зарубежных [20 – 25] охранных документов (патентов и авторских свидетельств).

Из анализа содержащихся в [20 – 25] технических решений можно отметить следующее.

1). Существенная часть рассмотренных устройств имеет конструктивное исполнение и принцип действия, предполагающие использование в погруженном состоянии. Возможным и самым значительным достоинством использования сейсмоисточников в погруженном состоянии является уменьшение расстояния, проходимого излучаемой волной до поверхности дна водоёма, а значит уменьшение потерь акустической энергии на рассеяние, расхождение и затухание волн в водной среде. Однако здесь следует помнить о недостатках, аналогичных приведённым в п. 1.2, связанных с погружением пневмопушек: проблемы герметизации, усложнение эксплуатации и опасность взаимодействия с водорослями, сетями и рельефом дна. Очевидно, что на мелководье описанные недостатки могут сказываться в большей мере. В некоторых рассматриваемых установках двигатель необходимо располагать вблизи излучающего элемента, что обуславливает ещё один недостаток погружного использования. Расположение двигателя вблизи излучателя существенно утяжеляет и усложняет конструкцию сейсмоисточника, а значит и работу спускоподъёмных механизмов.

2). Часть установок конструктивно жёстко привязана к определённому типу двигателя. Так, например, в [12] частью излучающего диска является токопроводящая медная пластина. Недостатком зависимости конструкции от типа двигателя может состоять в неудачном выборе двигателя. Т. е. если данный тип двигателя не может согласованно работать на внешнюю нагрузку и не имеет возможности вариации режима, то вся конструктивная схема окажется бесполезной, её возможные достоинства окажутся нераскрытыми.

3). Некоторые водные сейсмоисточники предполагаются с излучающими поверхностями, направленными в разные стороны. Такое свойство ведёт к неоправданному увеличению расхождения акустической волны за счёт исходного излучения в разные (не только в сторону дна) направления.

Несмотря на то, что описанные в [11 – 25] решения водных сейсмоисточников не получили практического распространения, некоторые из них представляются интересными и возможными для развития. Как, например, источник сейсмических сигналов, описанный в [25]. Он содержит плавсредство, корпус которого частично погружен в воду и выполняет функцию излучателя сейсмических волн, пригруз и линейный силовой привод (источник механической силы). Первая подвижная часть привода жестко присоединена к днищу плавсредства, а вторая – к пригрузу, в свою очередь опирающемуся через упругие элементы (пружины) на днище плавсредства. Как видно из описания к достоинствам такой конструкции можно отнести простоту, поверхностное расположение, возможность применения максимально подходящего типа силового привода. Недостатком этого сейсмоисточника является его низкая сейсмическая эффективность, обусловленная низким

коэффициентом преобразования механической энергии силового привода в сейсмическую из-за большой массы плавсредства, являющегося излучателем сейсмической энергии, и затратами энергии на создание поверхностных волн во время формирования основной, полезной волны.

В [9, с. 47 – 51] приведена сравнительная таблица основных типов водных сейсмоисточников, для наглядности приведём здесь её часть.

Таблица 1.1.

Характеристики основных типов водных сейсмоисточников

Параметры	Тип источника					
	Взрывные	Пневматические	Газовой детонации	Электроискровые	Вибраторы	Имплозивные
1	2	3	4	5	6	7
Запасенная энергия, кДж	>400	200-300	80	0,1-150	-	200-400
Полоса частот излучаемой энергии, Гц	10-80	5-50	40-100	80-1000	10-270	0-250
Амплитуда сигнала, приведённая к расстоянию 1 м, МПа	30	5-15	10	-	-	1-8,3
Акустический КПД, %	-	2-3	<2	1,5-2	20-40	2-5
Периодичность воздействия, с	15-30	3-30	6-10	4-30	-	6-8

Анализируя таблицу 1.1 и приведённые выше характеристики сейсмоисточников можно заключить следующее. Наличие большого числа типов сейсмоисточников, а также параметров их сравнения (технических, эксплуатационных, экономических, экологических) говорит об отсутствии в нише водных сейсмоисточников оптимальных, устоявшихся решений. Направление источников для водной сейсморазведки находится не просто в развитии, а в поиске направлений развития. Такая ситуация обуславливает возможность существенного увеличения эффективности водных сейсмоисточников.

Рассмотрим на примере сейсмоисточников наиболее распространённого [9, с. 5; 26, с. 329] – пневматического типа основные возможности повышения эффективности.

1.2. Особенности сейсмоисточников-пневмопушек

Принцип работы пневмопушек заключается в быстром создании в водной среде объёма, заполненного воздухом под давлением. При создании такого объёма в жидкости создаются значительные давления (десятки атмосфер). Что и приводит к генерации сейсмических волн. Спектр излучаемых волн зависит от объёма воздуха, поступающего из пушки в воду. По этой причине "мощность" пневмопушки определяется объёмом сжатого в ней воздуха. Для

широкополосного акустического спектра применяют одновременную работу нескольких пневмопушек различной энергии.

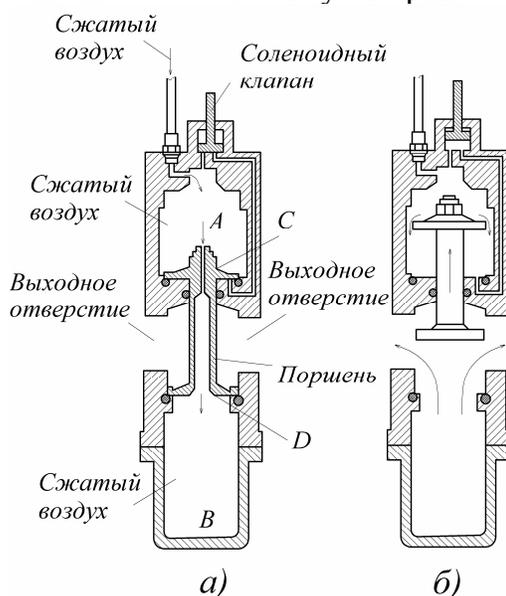


Рис. 1.1. Пневмопушка: а – готовая к работе; б – во время выброса.

Рассмотрим работу пневмопушки на примере конструкции фирмы Volt (США) [26] по рис. 1.1. Состояние готовности к работе (рис. 1.1а) характеризуется высоким давлением воздуха в камерах А и В. Для срабатывания пневмопушки открывают клапан. При этом у воздуха, находящегося в камере А появляется возможность по специальному каналу поступать под поршень. Тем самым резко уменьшается усилие удерживающее поршень в исходном положении и происходит выброс воздуха в воду из камеры В.

В описанной работе пневмоисточника и в особенностях взаимодействия выброшенного воздуха со средой заложены некоторые принципиальные недостатки. Выделим из них основные, возможное

устранение которых было бы полезно для повышения технических и эксплуатационных показателей водных сейсмоисточников.

1). Открытие отверстия для выпуска сжатого воздуха обычно обеспечивается специальным электромагнитным клапаном с последующим применением двухступенчатого пневмоусиления. Такая система обеспечивает недостаточную точность синхронизации работы нескольких пневмопушек между собой и с сейсмостанцией. Кроме того, сложность системы управления снижает надёжность её работы.

2). Сейсмоисточник необходимо опускать в воду, что усложняет его эксплуатацию. Во-первых, требуется дополнительное время и оборудование для спускоподъемных работ. Во-вторых, погружённое на кабель-канате оборудование может зацепиться за различные препятствия, например водоросли, рыболовные сети.

3). Выброшенный в воду воздух характеризуется избыточным давлением, которое приводит к расширению воздушной полости в воде. Вследствие инертности массы воды, разогнанной расширяющимся газовым пузырьём, процессы проходят равновесное состояние. Т.е. состояние, при котором давление воздуха внутри полости и гидростатическое давление жидкости, окружающей её, равны. Затем наступает фаза сжатия, которая также "проскакивает" равновесное состояние. Далее процессы повторяются с затухающей амплитудой. Таким образом возникает т.н. эффект пульсации газового пузыря.

Пульсация газового пузыря во время его движения к поверхности воды создаёт сейсмические помехи, существенно затрудняющие обработку и интерпретацию получающегося сейсмического материала. Существующие

различные способы уменьшения эффекта пульсации приводят к дополнительным экономическим затратам на усложнение устройств, а иногда и к снижению КПД источника.

4). Применение компрессора (или достаточного количества баллонов со сжатым газом), передача воздуха по шлангам в пневмопушку для её "заряда" сопряжены с эксплуатационными недостатками и определяют низкий коэффициент использования первичного источника энергии в сейсмическую.

5). На формирование газовой полости существенное влияние оказывает глубина, на которую погружается сейсмоисточник. Это связано с зависимостью от глубины гидростатического давления жидкости. В результате указанной зависимости использование пневматических сейсмоисточников на небольших глубинах становится нецелесообразным из-за значительных потерь излучаемой энергии, что затрудняет сейсморазведку на мелководье.

6). Использование пневмопушек может наносить существенный экологический вред (см. п. п. 2.4).

Необходимость устранения данного недостатка особенно актуализируется в последнее время – в связи с ростом объёмов проводимых сейсморазведочных работ на акваториях (на шельфе и континентальных водоёмах – реках, озёрах).

Для исключения (или существенного снижения) указанных негативных явлений требуется, возможно, принципиально иной тип сейсмоисточников для акваторий, отличающийся минимальным воздействием на биосферу и экономичностью.

Вышеперечисленные недостатки в разной степени отрицательно сказываются на экономической эффективности водных сейсморазведочных работ. Но многие из них связаны с несколькими общими особенностями наиболее распространённых типов водных сейсмоисточников:

1) обусловленное принципом действия создание в водной среде макронеоднородностей, сравнимых с длиной излучаемых волн. Это могут быть газовые, паровые, механические полости создаваемые источниками различного типа;

2) необходимостью погружения источника на значительную глубину (существенно превышающую его линейные размеры);

3) низкое использование энергии первичного источника. В условиях автономной работы сейсморай на профиле это является весьма существенным недостатком.

Поиск лучшего решения может быть связан с использованием источников сейсмических сигналов основанных на принципах, не требующих преодоления недостатков вышеперечисленных "родовых" особенностей.

1.3. Возможности и проблемы использования опыта наземной сейсморазведки

В последние десятилетия в наземной сейсморазведке были сделаны крупные шаги, в направлении совершенствования средств возбуждения сейсмических сигналов. Успешно применяются наземные источники трёх типов: вибрационного, кодоимпульсного и импульсного. Они существенно потеснили (и продолжают теснить) взрывной способ сейсмического воздействия.

В последние десять лет значительный, всё увеличивающийся, сегмент объёмов сейсморазведочных работ осваивается импульсными сейсмоисточниками электромагнитного типа [27 – 31]. Этому способствуют их простота, надёжность, приемлемая согласованность работы на нагрузку, в совокупности определяющие высокую технико-экономическую эффективность их применения, особенно в удалённых и труднодоступных районах проведения разведочных работ.

С учётом опыта создания наземных импульсных электромагнитных сейсмоисточников, предполагается возможным использование заложенных в них идей и технических решений при разработке источника для водной сейсморазведки. При этом возникают новые научно-технические задачи и проблемы, например:

- проблема согласования работы сейсмоисточника на водную среду, требующая поиска наилучшего режима электромеханического преобразования;
- задача анализа работы специализированной электромеханической системы сейсмоисточника;
- вопрос о возможностях работы установки в переходных зонах (не только на воде, но и на земле);
- проблемы конструктивного исполнения и в частности, задача обеспечения герметичности узлов и блоков установки;
- вопрос о влиянии толщины водного слоя на прохождение сигнала и, в конечном итоге, получающийся сейсмический материал и т.д.

Решение этих и других проблем и задач может позволить создавать и развивать эффективные, серийноспособные водные сейсмические источники.

Выводы

1. Особенности водных сейсмических исследований обусловили своеобразие и многообразие создаваемых водных сейсмоисточников. Развитие большинства технических решений, при этом, происходило на иных принципах действия, нежели в наземной сейсморазведке.

Многообразие средств (сейсмоисточников) и параметров их сравнения в узкой области технического применения (водной сейсморазведке)

свидетельствует о перспективности поиска направлений развития этих средств и, соответственно, возможности существенного увеличения их эффективности.

2. Большинство недостатков самых распространённых водных сейсмоисточников – пневмопушек, неизбежно связаны с принципами их конструкции, действия и необходимыми условиями эксплуатации. Поэтому значительное снижение, а тем более устранение имеющихся существенных недостатков не может быть получено совершенствованием пневмопушек, но водных сейсмоисточников вообще.

3. К возможному перспективному развитию водных сейсмоисточников предлагаются некоторые базовые свойства, которые необходимо придать разрабатываемым сейсмоисточникам:

- поверхностное расположение;
- применение высокоиспользуемого типа силового привода, для которого возможно обеспечить согласование с нагрузкой – водной средой;
- простота конструкции;
- отсутствие создания макронеоднородностей (полостей) в водной среде при работе установки.

4. В работе предлагается водный сейсмоисточник, полученный с использованием идей и решений наземного импульсного электромагнитного источника сейсмических колебаний. Основанием к предполагающейся перспективности такого заимствования являются достижения и успехи наземных сейсмоисточников указанного типа. Однако специфика водной среды обуславливает новые задачи и проблемы, требующие учёта при проектировании.

ГЛАВА 2. ВОДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЕЙСМОИСТОЧНИК С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

В главе приведено описание и обоснование конструктивной схемы и типа силового привода, а также показаны особенности схемы электрического питания и обеспечиваемого ей режима энергопреобразования.

2.1. Конструктивная схема

Для проектирования конструктивной схемы водного сейсмоисточника за основу (отправную точку) был взят импульсный электромагнитный наземный сейсмоисточник типа "Енисей" – СЭМ [30, 32] и "Геотон" [33]. Сейсмоисточники типа "Енисей" – СЭМ были разработаны и впервые испытаны Научно-исследовательской лабораторией №6 Тольяттинского политехнического института (ныне Тольяттинский государственный университет) под руководством д.т.н., профессора Ивашина В. В. Как показал успешный опыт дальнейшего применения и развития [27 – 30] импульсных электромагнитных сейсмоисточников, использованные в них конструктивные решения были просты и эффективны. Поэтому полезным представляется показать достоинства и возможности их конструктивной схемы, предлагаемые к наследованию в разрабатываемом водном сейсмоисточнике.

2.1.1. Импульсный электромагнитный наземный сейсмоисточник.

Упрощенная механическая система сейсмоисточника приведена на рис. 2.1, согласно ей сейсмоисточник включает в себя: плиту-излучатель 1, расположенную на поверхности грунта; на плите-излучателе установлен, с возможностью вертикального перемещения, массивный пригруз 2, к которому жёстко присоединён индуктор 3 корокоходового электромагнита. Индуктор 3 отделен от якоря 4 с помощью стоек 5 зазором 6 (δ). При пропускании по размещённой в пазах индуктора обмотке возбуждения 7 импульса тока от специальной системы питания якорь под действием потока Φ магнитного поля притягивается к индуктору, передавая через стойки и плиту-излучатель на грунт усилие электромагнита, тем самым формируя волну давления. Массивный блок

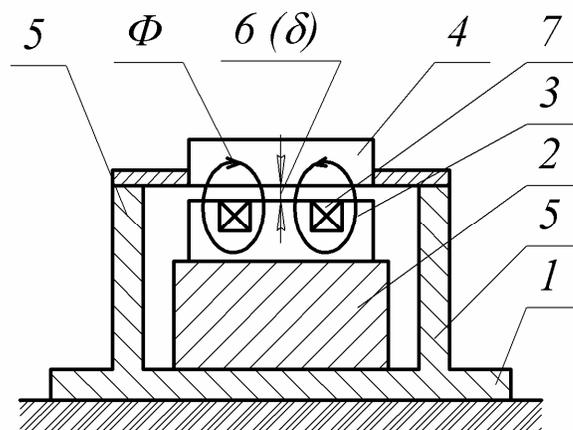


Рис. 2.1 Упрощенная механическая система сейсмоисточника: 1 – плита-излучатель, 2 – пригруз, 3 – индуктор, 4 – якорь, 5 – стойки, 6 – зазор d , Φ – магнитный поток.

индуктор – пригруз подлетает вверх, ударяет по якорю и поднимает его над стойками плиты-излучателя. Опускание индуктора и якоря на исходные места происходит под действием силы тяжести.

К достоинствам описанной конструкции (рис. 2.1) относится в частности следующее:

- применение двигателя электромагнитного типа, обладающего высоким коэффициентом преобразования электрической энергии первичного источника питания в механическую энергию движения плиты-излучателя (см. раздел 2.2);
- неразрушающее воздействие на грунт за счёт относительно малого рабочего хода подвижных частей двигателя;
- простота конструкции;
- возможности высокоточной синхронизации срабатывания, компоновки нескольких силовых приводов в одной установке и группирования сейсмоисточников за счёт электронного управления силовым приводом;
- повторяемость воздействий, то есть высокая корреляция параметров формируемых импульсов.

Кроме того, данная конструкция имеет существенные возможности развития [34] за счёт повышения согласованности с нагрузкой (грунтом).

Известен [30, с. 29, 30; 31, с. 33 – 37] водный вариант наземного сейсмоисточника "Енисей-СЭМ-100" – сейсмоисточник "Енисей-ВЭМ-100". Конструктивная схема и параметры электромеханической системы первого унаследованы вторым без изменений и соответствуют рис. 2.1. Такой подход к проектированию не может позволить выявить и оценить наилучший режим работы на водную нагрузку и не допускает перенастройку при работе в транзитных зонах. Однако положительные результаты опробования водного сейсмоисточника "Енисей-ВЭМ-100" свидетельствуют о перспективности установок подобного типа.

2.1.2. Импульсный электромагнитный водный сейсмоисточник.

Упрощённая схема механической системы разработанного импульсного электромагнитного водного сейсмоисточника [35] приведена на рис. 2.2, а особенности конструктивной реализации схемы (рис. 2.2) упрощённо представлены на рис. 2.3. Номера позиций на рис. 2.2 и 2.3 совпадают.

В днище 1 плавсредства (жёстко закреплённом на нём основании 1 на рис. 2.3) выполнена подвижная относительно днища плита-излучатель 2. Над которой на определённом расстоянии 3 (δ_2) с помощью пружин 4 ввешен ударник 5. На стойки 6 ударника опёрт якорь 7 электромагнита, индуктор 8 которого отделён от якоря зазором 9 (δ_1) и закреплён на пригрузе 10, опёртом (на рис. 2.2 не показано) на днище плавсредства.

Работа сейсмоисточника происходит следующим образом. При пропускании по размещённой в пазах индуктора обмотке возбуждения 11 импульса тока от специальной системы питания якорь под действием потока 12 (Φ) магнитного поля притягивается к индуктору передавая через стойки, ударник и излучающую плиту в водную среду усилие электромагнита и тем самым формируя импульс

давления в ней. Массивный блок "индуктор-пригруз" подлетает вверх, ударяет по якорю и поднимает его над стойками ударника. Опускание под действием силы тяжести индуктора и якоря в исходное положение происходит с применением гидравлических демпферов. Герметизация плавсредства в месте установки генератора сигналов осуществлена за счёт использования диафрагмы 13 из эластичного материала (резины или полиуретана). При работе сейсмоисточника диафрагма должна прогибаться вниз под действием развиваемого двигателем усилия и обеспечивать необходимое для создания сейсмической волны объёмное возмущение в воде, сопровождающееся возникновением в воде импульса давления.

На упрощенной конструктивной схеме (рис. 2.3) дополнительно к изображённому на рис. 2.2 показаны:

- размещение пригруза на стойках 14,

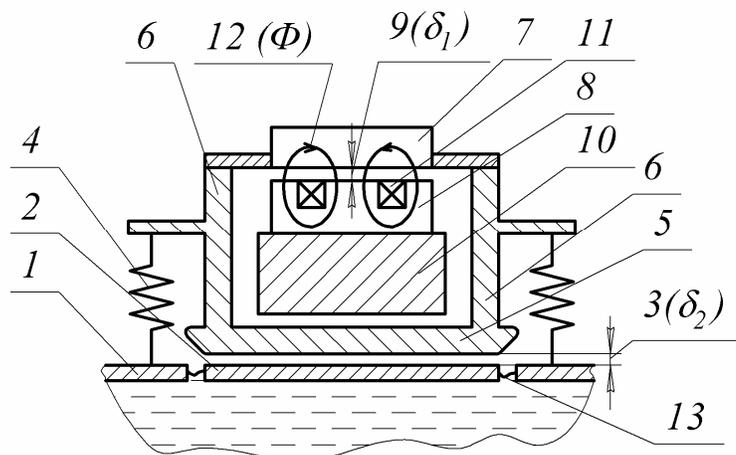


Рис. 2.2. Упрощенная механическая система сейсмоисточника: 1 – днище плавсредства, 2 – плита-излучатель, 3 – зазор d_2 , 4 – пружины, 5 – ударник, 6 – стойки якоря, 7 – якорь, 8 – индуктор, 9 – зазор d_1 , 10 – пригруз, 11 – обмотка возбуждения, 12 – магнитный поток Φ ; 13 – диафрагма.

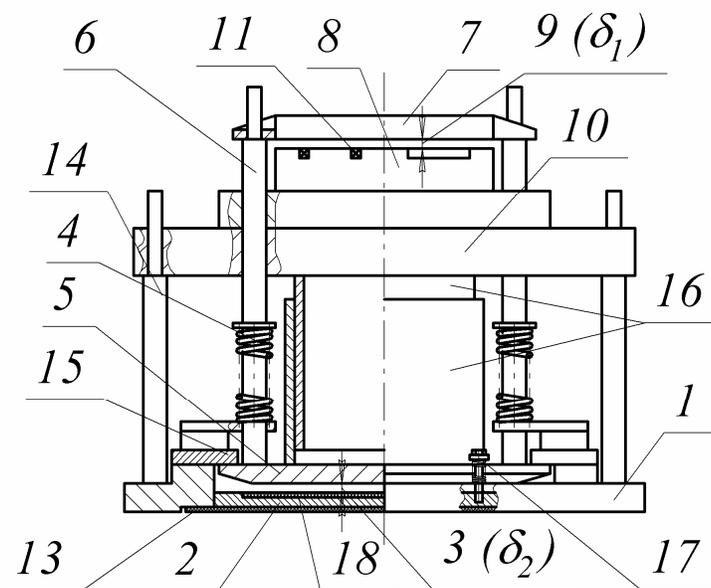


Рис. 2.3. Упрощенная конструктивная схема сейсмоисточника: 1 – основание (днище плавсредства), 2 – плита-излучатель, 3 – зазор d_2 , 4 – пружины, 5 – ударник, 6 – стойки якоря, 7 – якорь, 8 – индуктор, 9 – зазор d_1 , 10 – пригруз, 11 – обмотка возбуждения; 13 – диафрагма; 14 – стойки пригруза; 15 – упор; 16 – направляющий подшипник; 17 – подвес излучающей плиты; 18 – упругая прокладка.

жёстко связанных с основанием и, соответственно, днищем плавсредства;

- способ фиксации положения ударника за счёт поджатия его к упорам 15 пружинами 4;

- пространственное согласование движения частей сейсмоисточника с использованием направляющего подшипника 16 (помимо стоек якоря 6 и пригруза 14), одна движущаяся часть которого закреплена на пригрузе 10, а другая – на ударнике 5;

- специальный подвес 17 плиты-излучателя, позволяющий плите перемещаться вертикально вниз;

- размещение прокладки 18 из резины, либо из полиуретана. Такая прокладка необходима для согласования с нагрузкой (акустической средой) и исключения жесткого удара "металлом по металлу" (ударника 5 по плите 2). Для лучшего согласования с нагрузкой может осуществляться изменение упругости прокладки её перфорированием. Вопросы согласования с использованием дополнительных упругих и различных режимов работы электромагнитного привода элементов рассмотрены ниже, в разделах 3.2 и 3.3.

Электромагнитный привод сейсмоисточника может иметь различные режимы работы:

- 1) режим свободного ускорения** ударника 5 на большей части рабочего зазора (зазора 9 – между якорем и индуктором на рис. 2.2), с ударом в конце рабочего зазора по плите-излучателю 2; в этом режиме величина зазора δ_2 немного меньше величины зазора δ_1 ;

- 2) режим давления**, при котором якорь 7 через стойки 6 давит ударником 5 на излучающую плиту 2; при этом $\delta_2 = 0$;

- 3) промежуточный режим**, когда ударник 5 источника свободно разгоняется на части рабочего зазора 9, а затем наносит удар по излучающей плите 2 и "додавливает" ее на оставшейся части рабочего зазора 9; при этом $0 < \delta_2 < \delta_1$.

Более подробный чертёж конструкции и фотография сейсмоисточника представлены в Приложении 3.

Новизна описанного (а также возможных вариантов) технического решения конструкции поверхностного импульсного водного сейсмоисточника с электромагнитным приводом имеет подтверждение в виде патента РФ [36].

В связи с указанной новизной типа водного сейсмоисточника его физическая реализация представлялась в виде опытно-экспериментального образца. Соответственно, экспериментальный характер был учтён при проектировании его конструкции вариативностью некоторых основных параметров системы. Так, в конструкцию была заложена возможность регулировки зазора в силовом электромагните и зазора между ударником и прокладкой на излучающей плите. Как будет показано далее (п. 3.2), эти параметры являются очень важными для эффективности преобразования потенциальной энергии конденсаторной батареи в кинетическую энергию излучающей плиты. Необходимо также отметить, что конструкция силового электромагнита и система питания были спроектированы с возможностью

изменения исходной энергии (энергии конденсаторной батареи) в широких пределах.

2.2. Электромагнит силового привода

2.2.1. Обоснование выбора типа силового привода.

Как следует из пояснения принципа действия импульсных сейсмоисточников (п.п. 2.1.1 и 2.1.2), их рабочий орган (излучающая плита или ударник) в процессе взаимодействия с нагрузкой должен испытывать линейные перемещения на небольшие расстояния. При этом развиваемое на рабочем органе усилие должно быть относительно большим (порядка десятков тс) для обеспечения большей мощности излучения и достигать максимума за малое время (порядка миллисекунды), меньшее времени формирования сейсмической волны. Достижение указанных функциональных особенностей при высокой эффективности преобразования энергии, в настоящее время лучше всего обеспечивается [см. например, 37, с. 9] импульсными линейными электромеханическими преобразователями (линейным электроприводом).

Из приведённых в работе [37, с. 9] достоинств применения импульсных линейных электромеханических преобразователей, можно отметить несколько основных, характерных для рассматриваемого случая:

- 1) преобразование электрической энергии в механическую работу с исключением промежуточных элементов, связанных с изменением типа движения (например: из вращательного – в линейный);
- 2) простота и надёжность линейного электропривода;
- 3) возможность обеспечения высоких энергетических показателей, что особенно важно в установках, разрабатываемых для полевых условий;
- 4) удобство регулирования режимов работы за счёт использования электронных схем управления и т.д.

Среди линейных электроприводов различного типа (индукционно-динамического, электродинамического, электромагнитного и т.д.) в настоящее время наиболее широкое [37, с. 26] применение находят линейные электромагнитные приводы. Основными преимуществами, обеспечившими предпочтительность приводов электромагнитного типа являются [37, с. 10]:

- 1) конструктивная простота;
- 2) надёжность и долговечность работы;
- 3) экономичность регулирования;
- 4) сравнительно высокие удельные показатели и КПД преобразования энергии.

В исследуемом в настоящей работе типе технических устройств – импульсных сейсмоисточниках, применяются (в той или иной степени распространенности) силовые приводы различного принципа действия. Так, например [38], импульсное воздействие формируют за счёт: сбрасывания на грунт груза (с высоты нескольких метров, массой до 3000 кг); энергии продуктов быстрого горения смесей; использования электроприводов

различного типа действия и т.д. Большинству приведённых принципов действия присущи потребление большой мощности, низкая точность синхронизации (недостаточная для группирования источников), значительные эксплуатационные расходы.

Поэтому в настоящее время преобладающими типами линейного силового привода импульсных невзрывных сейсмоисточников являются индукционно-динамический двигатель (ИДД) [39 – 42] и короткоходовые и длинноходовые электромагнитные двигатели (ЭМД).

Конструктивное решение с ИДД [43 – 51] позволяло, с одной стороны, выполнить двигатель со свободным выбегом якоря, что исключало удар якоря и индуктора в момент выбора зазора зоны преобразования энергии. С другой стороны, обеспечивалась более высокая удельная характеристика в смысле отношения развиваемой силы к весу якоря. Индукционно-динамический привод был применён для мощного коммутационного привода с розеточной контактной системой, в первом сейсмоисточнике ГУК-1 с механическим преобразованием ("трансформатором") рычажного типа [49, 50, 51] и других устройствах [43 – 48].

Более глубокое изучение возможностей короткоходового электромагнита (например, [52]), обусловило начало его использования в задачах, где ранее применялся ИДД. Это позволило постепенно отказаться от использования в конструкции механических трансформаторов различных модификаций рычажного и гидравлического типа. Режимы возбуждения магнитного поля стали реализовываться близкими к постоянству потокосцепления (см. п.п. 2.2.2), обеспечивающему наиболее эффективное преобразование магнитной энергии в механическую.

В конце 80^х были исследованы вопросы влияния неравномерности зазора по площади полюсов якоря и индуктора на энергопреобразование, применения уравнивающих соединений для обеспечения более равномерного распределения индукции поля возбуждения по площади полюсов, возможности и особенности выполнения электромагнита цилиндрической формы и некоторые другие вопросы [53 – 57].

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования, а также опыт практического применения короткоходовых электромагнитов позволили развить их достоинства: простоту конструкции, возможность использования в эффективных режимах энергопреобразования, возможности согласования с нагрузкой. В тоже время, стали очевидными ограничения в развитии и применении длинноходовых ЭМД и ИДД, обусловленные: необходимостью согласования большого (до 10 – 20 мм) хода якоря с потребностью ограничения деформации грунта (до ~3 мм); повышенными энергетическими потерями и конструктивными сложностями; наличием паразитных боковых сил, обусловленных несоосностью цилиндрических конструкций. Всё это в итоге привело к переходу на использование ЭМД на короткоходовых электромагнитах и, в частности, к использованию их в новом применении – водном импульсном сейсмоисточнике.

2.2.2. Режим энергопреобразования с постоянством потокосцепления.

Обоснование выбора режима.

Энергетика процессов преобразования электрической энергии конденсаторной батареи в механическую энергию движущегося якоря наиболее полно может быть описана с помощью т.н. энергетических диаграмм (ЭД) [31]. В связи с циклическим характером процесса энергопреобразования в электромагните линейного привода, энергетические диаграммы иногда также называют магнитными циклами (МЦ) [37, с. 188].

ЭД представляет собой зависимость потокосцепления Ψ обмотки возбуждения от тока I проходящего по обмотке. Важной особенностью ЭД является то, что площади, образуемые собственно кривой МЦ, либо частью её и одной из осей, а также линией проекции определённой точки кривой на ось характеризуют различные энергии (механическую, магнитную, потерь) данного МЦ. Поэтому все изменения в состоянии электромагнита (величины зазора, насыщения, доли потоков рассеяния, вихревых токов и т.д.) определённым образом сказываются на кривой МЦ. И если характеристика энергетики процессов важна для теоретических и лабораторных экспериментальных исследований, то информация о поведении электромагнитного привода может быть использована при эксплуатации установки для диагностики и настройки. Последнее, с учётом простоты практической реализации измерений, особенно актуально при работе в полевых условиях.

Вид кривой МЦ можно сформировать конструкцией электромагнита и его системой электрического питания. Это обстоятельство требует определения наилучшего типа МЦ для эффективного выполнения двигателем работы в составе установки данного назначения и при данных условиях. Выделяют (например, в [37]) пять базовых разновидностей МЦ, которые со своими комбинациями охватывают всё многообразие возможных форм МЦ. Такие базовые МЦ обеспечивают режимы:

- 1) $I_n = I_k = I = const$ (с постоянством тока);
- 2) $\Psi_n = \Psi_k = \Psi = const$ (с постоянством потокосцепления);
- 3) $I_n < I_k, \Psi_n < \Psi_k$;
- 4) $I_n > I_k, \Psi_n < \Psi_k$;
- 5) $I_n > I_k, \Psi_n > \Psi_k$.

Рассмотрим вопрос выбора режима энергопреобразования применительно к выбранному ранее (в п.п. 2.2.1) типу силового привода – короткоходовому электромагниту. Для этого отметим некоторые особенности процесса его работы в цикле.

В исходном состоянии якорь электромагнита расположен на фиксированном расстоянии d_n от индуктора, при этом отсутствует электрический ток в обмотке якоря и магнитный поток в магнитопроводе якоря и индуктора. В таком положении характеристика намагничивания магнитопровода без учёта насыщения магнитной системы представляла бы прямую d_n (см. рис. 2.4), но с учётом насыщения реальных магнитных систем характеризуется кривой 1. Аналогично в конце рабочего хода, точнее, при

выбранном зазоре, характеристика намагничивания электромагнита принимает вид кривой 2 на рис. 2.4. Неидеальность смыкания поверхностей индуктора и якоря, а также наличие остаточной магнитной энергии в магнитопроводе после выбора зазора объясняют факт несовпадения начального участка кривой 2 с осью потокосцепления Ψ . Очевидно, что во время работы импульсного линейного электромагнитного двигателя (ИЛЭМД) рабочая точка, характеризующая состояние магнитной системы в каждый конкретный момент времени, переходит с кривой 1 на кривую 2 (рис. 2.4). Как упоминалось ранее, конкретный тип траектории такого перехода при заданной конструкции электромагнита будет определяться системой электрического питания привода.

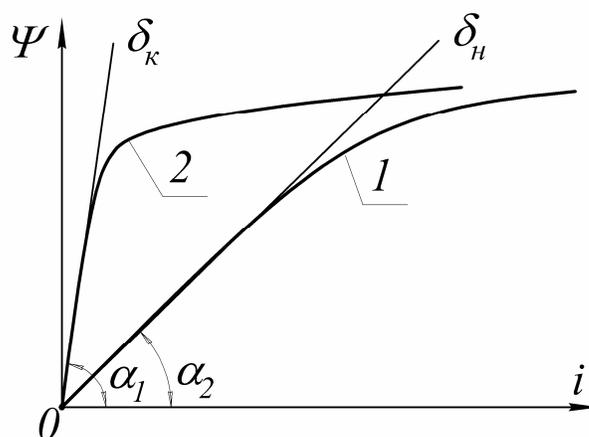


Рис. 2.4. Характеристики намагничивания магнитопровода (к вопросу выбора режима энергопреобразования).

Для обоснования целенаправленности формирования определённого режима следует отметить, что площадь на ЭД, ограниченная петлёй образованной кривыми 1, 2 (рис. 2.4) и траекторией перехода пропорциональна сумме совершаемой приводом механической работы и потерям в стали магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов. Площадь, ограниченная кривой 2, осью потокосцепления Ψ и линией проецирующей на ось Ψ точку совпадения траектории перехода с кривой 2, определяет остаточную (оставшуюся после выбора зазора) магнитную энергию в электромагните.

Исходя из приведённых здесь особенностей ЭД короткоходового электромагнита и, с учётом его использования в качестве двигателя (что означает важность таких критериев как КПД и величина механической работы полученной в ходе преобразования из энергии другого типа), естественно предположить, что наилучшим режимом работы для него будет режим, в котором площадь т.н. петли будет максимальной. Максимум площади петли обеспечивается в режиме постоянства потокосцепления $\Psi = const$.

Таким образом, в рассматриваемом случае короткоходового электромагнита на продольном поле (с тяговым усилием вдоль силовых линий магнитного поля), применяющегося в составе импульсного линейного силового привода, наиболее эффективным режимом энергопреобразования является режим постоянства потокосцепления. Аналогичное утверждение также встречается, например, в работе [38], а в некоторых работах, например [37, с. 232] данный вывод получает аналитическое подтверждение. В работе [37] подтверждение состоит в том, что у преобразователя с продольным магнитным полем при $\Psi = const$ принимает максимальное значение коэффициент использования механической части цикла K_m . Этот коэффициент (K_m)

определяется отношением механической работы тяговой силы рассматриваемого МЦ преобразователя к предельной механической работе преобразователя, определяемой постоянной силой на перемещении x_{max} .

Особенности создания режима с постоянством потокосцепления.

В качестве непосредственного источника энергии для ИЛЭМД наилучшим образом в настоящее время подходит батареи из электрических конденсаторов. Конденсаторная батарея лучше других источников (аккумуляторов, ионисторов и т.д.) удовлетворяет требованиям, определяющимся её работой в составе импульсного электромагнитного сейсмоисточника. Так, например, она позволяет: быстро передать энергию в электромагнит; удерживать заданный объём энергии с минимальными потерями заданное время; многократно повторять цикл накопления и сброса энергии и т.д.

Режим, близкий к постоянству потокосцепления, обеспечивается специальной схемой разряда конденсаторной батареи, в которую помимо естественно присутствующих элементов и связей (конденсаторной батареи C подключённой через силовой ключ (например, тиристор VS) к обмотке электромагнита L) вводится полупроводниковый диод VD (рис. 2.5). Диод VD используется здесь в качестве элемента, обладающего высокой односторонней проводимостью и подключается катодом встречно к положительно заряженной обкладке конденсаторной батареи C .

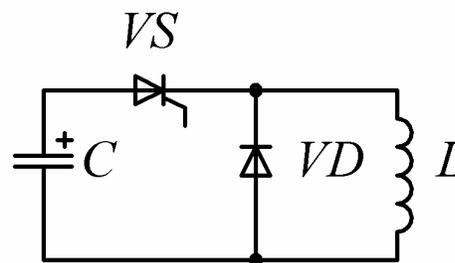


Рис. 2.5. Схема разряда конденсаторной батареи.

Формирование режима, близкого к постоянству потокосцепления, происходит следующим образом. Предварительно заряженная конденсаторная батарея C в момент t_0 (рис. 2.6) подключается, с открытием тиристора VS , к обмотке электромагнита L , начинается разряд (по контуру $C-VS-L-C$) ёмкости конденсаторной батареи на индуктивность электромагнита. Происходит переход энергии электростатического поля конденсаторов в энергию магнитного поля электромагнита. Как будет показано ниже, за время разряда ёмкости также происходит несущественное преобразование из магнитной энергии электромагнита в механическую энергию движения частей привода. В момент времени t_1 ток обмотки достигает максимального значения, а напряжение на

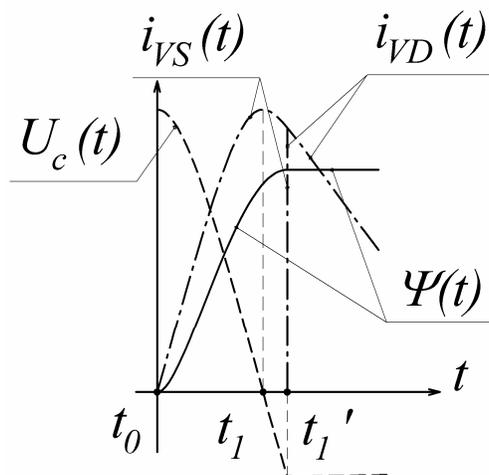


Рис. 2.6. Процессы при разряде конденсаторной батареи на обмотку электромагнита.

конденсаторной батарее становится равным нулю. "Перехват" тока из контура $C-VS-L-C$ в контур $L-VD-L$ происходит позднее максимума тока (в момент времени t_1'), что связано с влиянием активного сопротивления контура. При этом напряжение на ёмкости становится несколько отрицательным, это способствует более устойчивой работе тиристора.

После "перехвата" начинается переходный процесс затухания тока в контуре $L-VD-L$. В сравнении с временем выбора зазора постоянная времени контура велика, что и обеспечивает постоянство потокосцепления.

Для наиболее полного определения задач исследования предложенного ИЛЭМД отметим некоторые особенности процессов преобразования энергии связанные с ЭД (рис. 2.7) для режима, близкого к режиму постоянства потокосцепления. Как уже упоминалось выше и будет показано далее, основное энергопреобразование происходит между моментами максимума тока (t_1 , на рис. 2.7) и выбора зазора в электромагните (t_2 , на рис. 2.7). Уменьшение тока с I_n до I_k происходит в основном за счёт ЭДС движения.

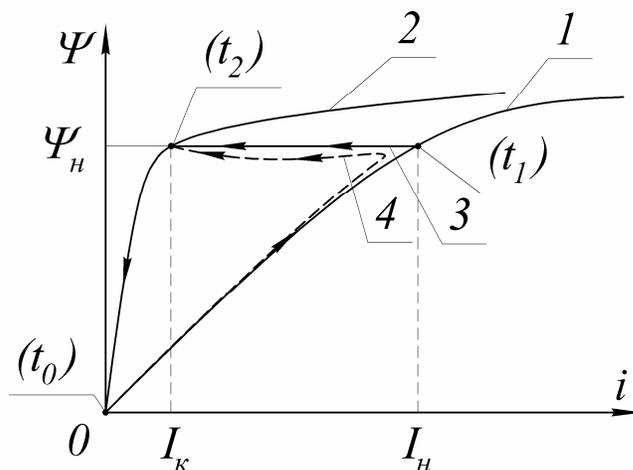


Рис. 2.7. Энергетическая диаграмма в режиме, близком к постоянству потокосцепления.

Из-за небольшого изменения зазора на интервале t_0-t_1 , а также в результате потерь на индуктивности пазового рассеяния и активном сопротивлении обмотки возбуждения, теоретический участок 3 в реальности имеет вид участка 4 (рис. 2.7).

С момента выбора зазора (t_2 на рис. 2.7) энергия, оставшаяся в магнитной системе, рассеивается за счёт затухания тока на активном сопротивлении контура.

Экспериментальное определение и анализ ЭД позволяет определять энергетический расклад в системе, а также особенности её состояния в том или ином режиме. Такая информация может быть особенно полезна на этапе проектирования и исследования опытного образца системы с ИЛЭМД, а, с учётом относительной простоты требующихся измерений, может служить для контроля работы и отладки промышленных образцов в полевых условиях.

Влияние фронта силы на электромеханическое преобразование.

Рассмотрим вопросы, связанные с упоминавшейся особенностью импульсного электромагнитного привода – этапом разряда накопительного конденсатора и соответствующим ему фронтом силы короткоходового электромагнита [58]. Покажем факторы, влияющие на длительность фронта, и проанализируем влияние фронта на электромеханическое преобразование.

В формируемом приводе импульсе силы $P(t)$ можно выделить два характерных участка (см. рис. 2.8) – фронт силы ($t_0 - t_1$) и основную часть ($t_1 - t_2$), в течение которой сила $P(t)$ остаётся примерно постоянной. Схематическими и конструктивными решениями можно изменять как длительность силового импульса, так и его фронт (t_ϕ).

Импульс силы формируется при разряде конденсаторной батареи на обмотки электромагнита, характеризующиеся индуктивным сопротивлением. Длительность фронта t_ϕ силы $P(t)$ при этом равна времени нарастания тока разряда, который изменяется по синусоидальному закону ($i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t)$) от нуля до максимального значения I_m , что составляет примерно четверть периода T колебаний. Таким образом, длительность фронта

$$t_\phi = \frac{1}{4} \cdot T = \frac{1}{4 \cdot f} = \frac{P}{2 \cdot \omega}, \quad (2.1)$$

где f – частота, 1/с;

ω – гармоническая частота, рад/с.

По экспериментальным данным длительность фронта t_ϕ составляет около $1,5 \cdot 10^{-3}$ с.

Частота свободных колебаний синусоидальной части тока, а значит, и длительность фронта импульса тока характеризуются выражением:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (2.2)$$

где L – индуктивность обмотки электромагнита, Гн;

C – ёмкость конденсаторной батареи, Ф.

Поскольку на фронте развиваемое усилие примерно пропорционально квадрату тока обмотки возбуждения ($P(t) \sim i^2(t)$), то закон изменения силы на фронте имеет вид:

$$P(t) = P_m \cdot \sin^2(\omega \cdot t) = \frac{P_m}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)). \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) с учётом (2.2) следует, что меньшую длительность фронта силы можно получить уменьшая величину C и/или L . Так как уменьшать энергоёмкость конденсаторной батареи нежелательно, то наиболее простым путём является уменьшение индуктивности обмотки за счёт снижения

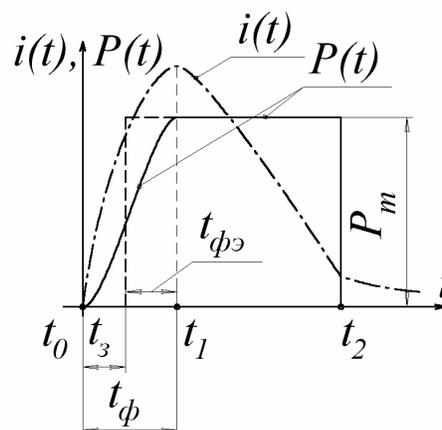


Рис. 2.8. Диаграмма тока обмотки возбуждения и силы электромагнитного привода.

количества её витков. Но с уменьшением числа витков обмотки связаны три основных недостатка. Во-первых, изготовление такой обмотки существенно сложнее технологически; во-вторых, значительно возрастает амплитуда разрядного тока и, в-третьих, возрастает импульсная мощность системы питания, увеличиваются потери на вихревые токи в обмотке и магнитопроводе. Увеличение t_ϕ снижает скорость нарастания силы и, соответственно точность синхронизации при одновременной работе нескольких сейсмоисточников.

Оценим влияние фронта импульса силы, его участие в электромеханическом преобразовании для водного импульсно сейсмоисточника ("Аква") с ИЛЭМД.

Чтобы сделать оценку с учётом влияния нагрузки, определим изменение зазора за время фронта для двух крайних режимов. Для режима, когда нагрузка абсолютно жесткая (якорь и ударник не перемещаются, а движется только индуктор с пригрузом) и при работе в режиме удара (когда движению якоря с ударником сопротивление практически не оказывается). Эти режимы назовём, соответственно, «холостой ход» и «короткое замыкание». И в первом и во втором случае нагрузка инерционная и происходят ускорения масс m под действием силы $P(t)$. Действием сил веса пренебрежем, так как их влияние на рассматриваемые процессы не может быть значительным.

Скорость массы m под действием силы $P(t)$:

$$v(t) = \int a \cdot dt = \int \frac{P(t)}{m} \cdot dt = \int \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot (1 - \cos(2 \cdot w \cdot t)) \cdot dt = \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot t - \frac{P_m}{2 \cdot m \cdot 2 \cdot w} \cdot \sin(2 \cdot w \cdot t) + K_v \quad (2.4)$$

При $t = 0$ $v(t) = 0$ и, следовательно, $K_v = 0$, то есть

$$v(t) = \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot \left(t - \frac{\sin(2 \cdot w \cdot t)}{2w} \right) \quad (2.5)$$

Перемещение массы под действием силы $P(t)$:

$$x(t) = \int v(t) \cdot dt = \int \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot \left(t - \frac{\sin(2 \cdot w \cdot t)}{2w} \right) \cdot dt = \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot \left(\frac{t^2}{2} + \frac{\cos(2 \cdot w \cdot t)}{(2 \cdot w)^2} \right) + K_x \quad (2.6)$$

При $t = 0$ $x(t) = 0$ и, следовательно, $K_x = -\frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot \frac{1}{(2 \cdot w)^2}$, тогда

$$x(t) = \frac{P_m}{2 \cdot m} \cdot \left(\frac{t^2}{2} + \frac{\cos(2 \cdot w \cdot t)}{(2 \cdot w)^2} - \frac{1}{(2 \cdot w)^2} \right) \quad (2.7)$$

При $t = t_\phi$,

$$x(t_\phi) = \frac{P_m \cdot t_\phi^2}{2 \cdot m} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{p^2} \right) \quad (2.8)$$

Для упрощения анализа динамики заменим сложный закон силы $P(t)$ на фронте t_ϕ действием максимальной силы P_m в течение времени $t_{\phi\Delta}$.

При постоянной силе P_m движение массы m равноускоренное:

$$x_y(t_{\phi\Delta}) = \frac{P_m \cdot t_{\phi\Delta}^2}{2 \cdot m} \quad (2.9)$$

При равенстве перемещений x_y и x получим время равноускоренного движения, эквивалентное времени движения на фронте сложной силы:

$$t_{\phi_3} = t_{\phi} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{2}{p^2}} \approx 0.545 \cdot t_{\phi} \quad (2.10)$$

Таким образом, постоянная сила P_m , действующая в течение времени t_{ϕ_3} после задержки $t_3 = t_{\phi} - t_{\phi_3}$ (рис. 2.8) вызовет такие же перемещения масс в механической системе сейсмоисточника, как сила $P(t)$ на фронте, за время t_{ϕ} .

В таблице 2.1 представлены результаты расчёта перемещений для двух режимов работы сейсмоисточника "Аква".

Таблица 2.1.

Значения перемещений за время фронта

Рассчитанная величина	Вид режима	
	"холостой ход"	"короткое замыкание"
Перемещение якоря с ударником $X_{\text{яу}}$, мм	0	0,197
Перемещение индуктора с пригрузом $X_{\text{ип}}$, мм	0,054	0,054
Изменение зазора в электромагните δ , мм	0,054	0,251
Относительное изменение зазора (в сравнении с 6 мм рабочего зазора) $\Delta\delta$, %	0,89	4,18

Величина выбора зазора (для сейсмоисточника "Аква", а также для других типов импульсных электромагнитных сейсмоисточников) на фронте импульса в реальных условиях находится между приведёнными в таблице значениями. И значения эти составляют несущественную часть (до 4 %) от всего зазора электромагнита. С точки зрения энергетики процесса фронт силы не оказывает существенного влияния на электромеханическое преобразование. То есть преобразование энергии из электрической через магнитную в механическую происходит, в основном, после формирования импульса силы, когда она максимальна.

2.2.3. Анализ электромагнита в программном комплексе Elcut 5.1.

Как упомянуто выше, выбранный для водного сейсмоисточника двигатель аналогичен применяющимся в наземных сейсмоисточниках. Он представляет из себя Ш-образный короткоходовой электромагнит с двумя обмотками возбуждения, включенными параллельно. Якорь и индуктор электромагниты набраны из листов (толщиной 0,5 мм) электротехнической стали 2212. (Рис. 2.9).

Отличительной особенностью использования электромагнита в водном сейсмоисточнике является необходимость работы на увеличенном зазоре (с 5 до 10 мм), которая связана с предусмотренными в конструкции ударными режимами. Поэтому представляется важным исследование вопроса о влиянии увеличения зазора на работу электромагнита. В частности, интерес представляет:

- 1) изменение силовых характеристик

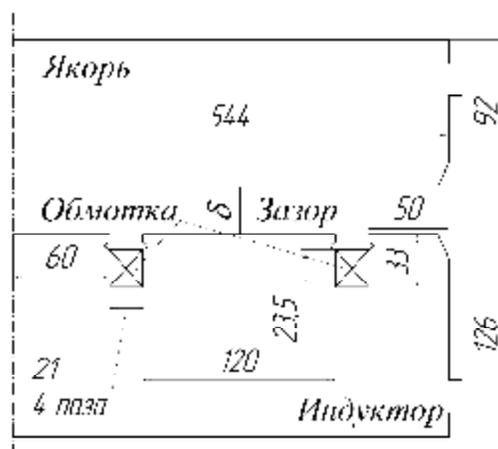


Рис. 2.9. Эскиз электромагнита водного сейсмоисточника.

(максимальной развиваемой силы);

2) влияние на составляющие энергетического баланса (потери, механическую энергию электромеханического преобразования в двигателе);

3) перераспределение магнитных потоков в электромагните (основного потока, потока пазового рассеяния, потока бокового и лобового выпучивания).

Исследование 1 и 2 вопросов проведено в п.п. 4.1.1 – 4.1.3 настоящей работы. Экспериментальное исследование третьего вопроса сильно затруднено. Например, весьма сложным представляется измерение пазового потока, так как, для этого пришлось бы вытаскивать обмотку возбуждения. Имеющаяся теоретическая методика, с помощью которой был рассчитан электромагнит [59] имеет ряд существенных упрощений, не позволяющих её применить.

Поэтому, исследование вопроса влияния на распределение магнитного потока было проведено с использованием современного программного комплекса Elcut 5.1.

Магнитная система электромагнита обладает осевой симметрией. Для упрощения, расчёт проводился по одной половине электромагнита. Влияние второй половины на формирование потока в центральном полюсе было учтено проведением линии нулевого магнитного потенциала непосредственно по оси симметрии (по которой электромагнит был разделён).

Программный комплекс Elcut 5.1 использует метод конечных элементов. Он разбивают расчетную область на большое число конечных элементов и, составляя и решая систему дифференциальных уравнений, проводит расчет магнитного поля.

Составление модели магнитной системы в пакете Elcut 5.1 включает в себя три этапа:

- задание геометрии магнитной системы;
- задание свойств областей магнитной системы, например, свойств магнитных материалов в виде кривых намагничивания $B(H)$;
- задание граничных условий для корректного расчета поля.

Задание геометрии производилось в соответствии с существующими размерами. В конструкции выделено три области, имеющих разные в магнитном и электрическом отношении свойства:

- область обмотки, с магнитной проницаемостью $\mu=1$ и намагничивающей силой F ;
- область воздушного зазора, разделяющей полюса индуктора и якоря с абсолютной магнитной проницаемостью $\mu=1$;
- области магнитопроводов с изотропными в магнитном отношении свойствами и кривой намагничивания, соответствующей стали 2212 для якоря и индуктора.

Расчёт проведён с использованием экспериментальных данных (табл. 4.2), для соответствующих значений зазора и начальной энергии емкостного накопителя.

В результате расчёта были получены картины магнитных полей рис. 2.10.

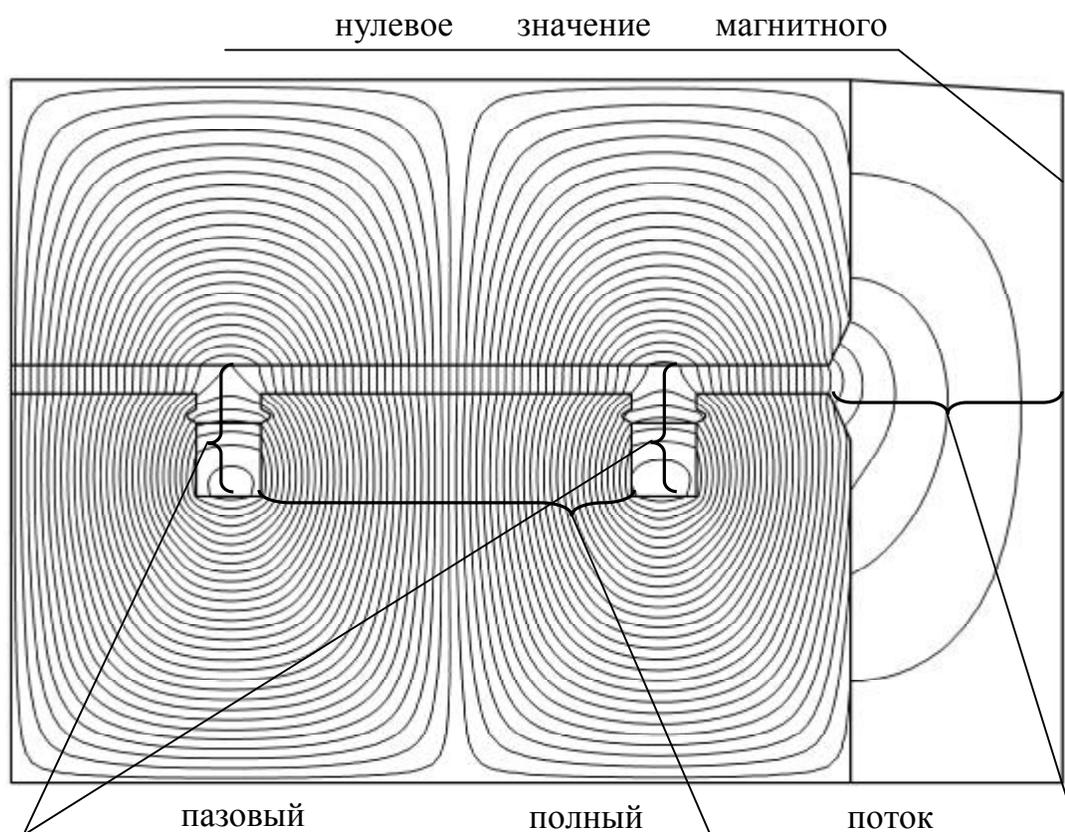
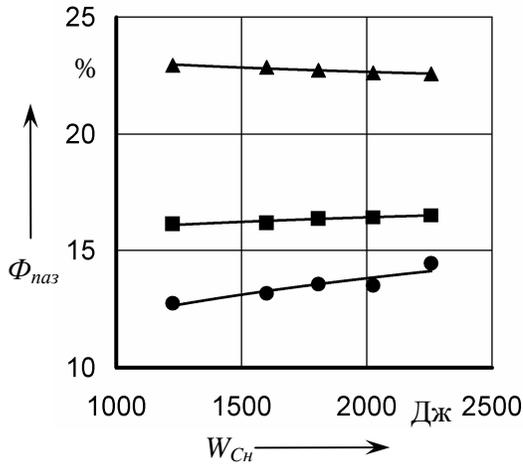


Рис. 2.10. Картина магнитного поля в электромагните.

По ним были определены составляющие магнитного потока:

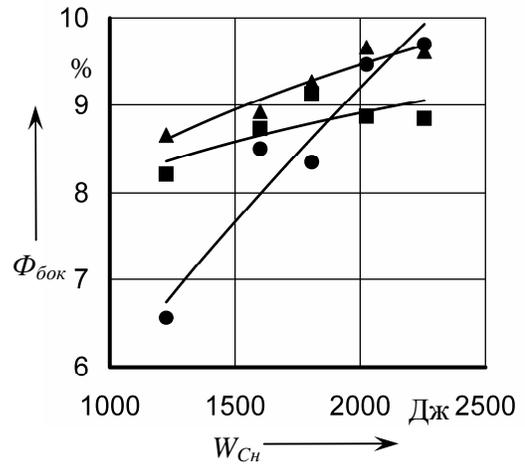
- потоки, проходящие через пазы и не заходящие в индуктор рис. 2.11;
- потоки бокового выпучивания рис. 2.12;
- суммарный поток рассеивания рис. 2.13;
- полный поток (в основании полюса) (рис. 2.14).

Для удобства, значения потоков на рис. 2.11 – 2.13 были представлены в процентах от полного потока, а значения полного и основного потока (рис. 2.14) приведены к соответствующим их же значениям, полученным на минимальной энергии накопителя (1225 Дж). Последнее сделано для удобства оценки роста значения потока.



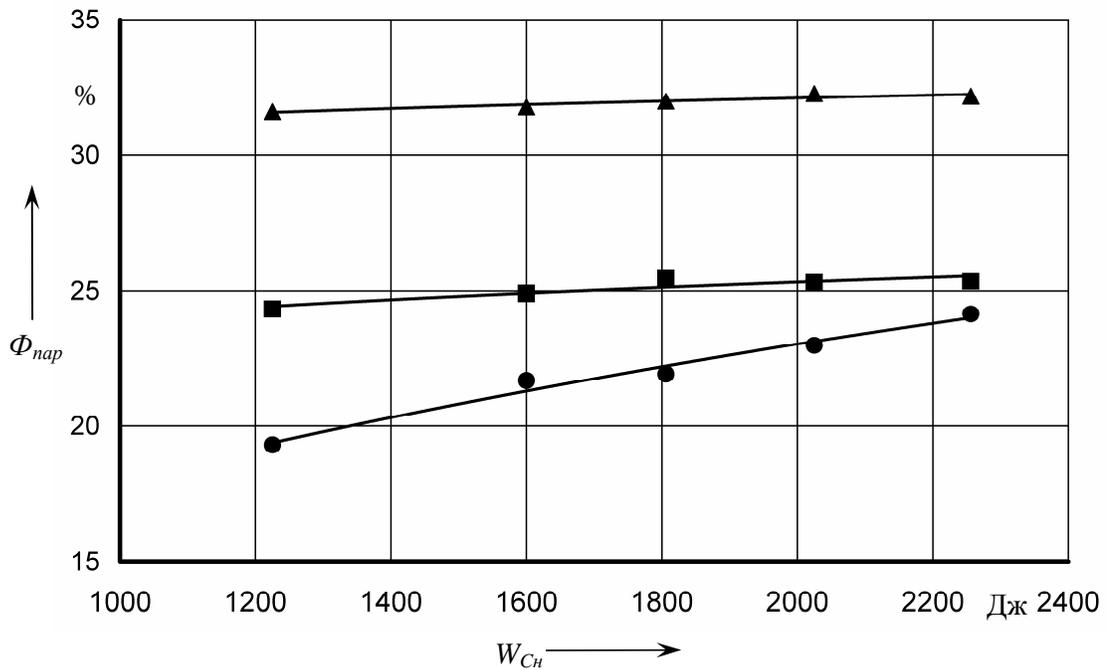
● - зазор 4,5 мм; ■ - зазор 6 мм; ▲ - зазор 9 мм.

Рис. 2.11. Пазовые потоки (здесь и далее – в процентах от полного).



● - зазор 4,5 мм; ■ - зазор 6 мм; ▲ - зазор 9 мм.

Рис. 2.12. Потоки бокового выпучивания.



● - зазор 4,5 мм; ■ - зазор 6 мм; ▲ - зазор 9 мм.

Рис. 2.13. Сумма потоков рассеяния.

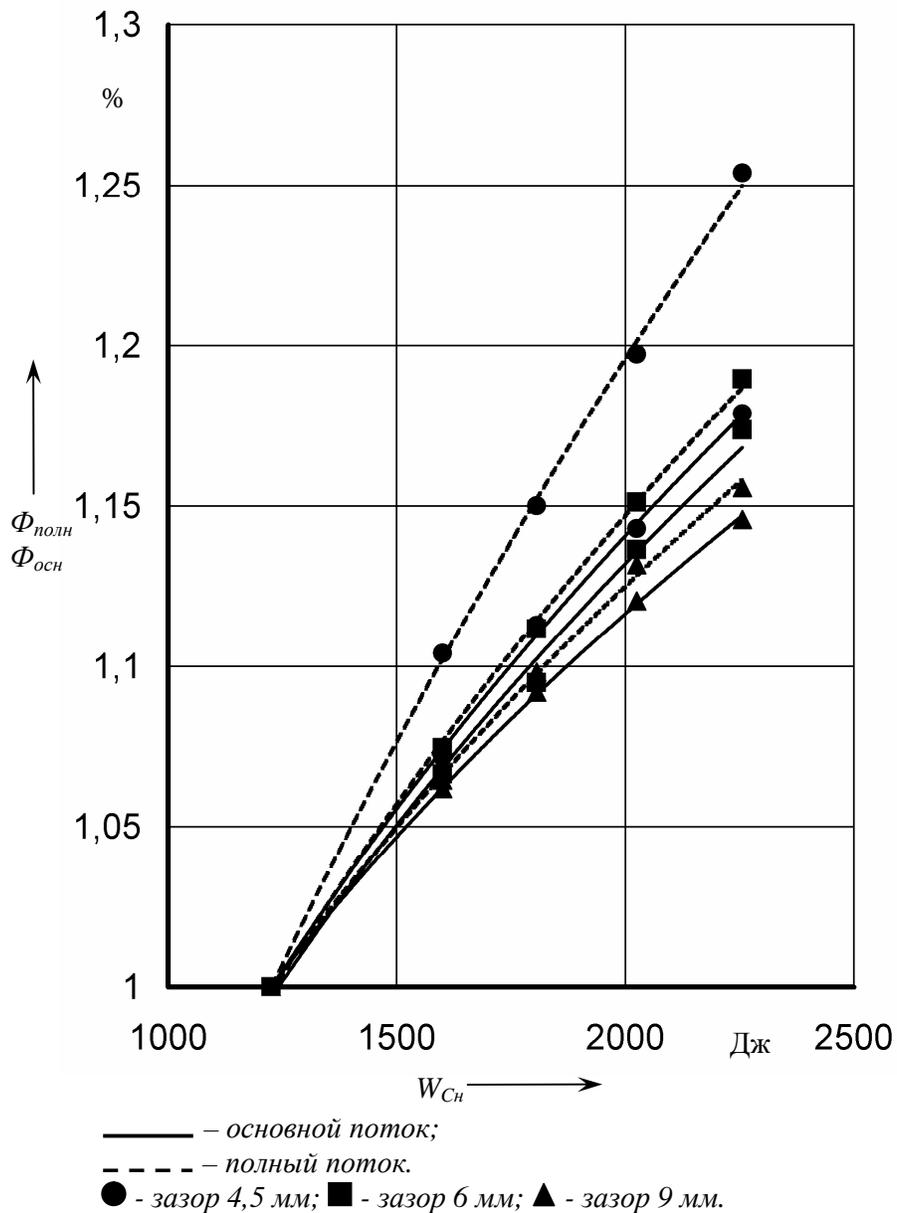


Рис. 2.14. Основной и полный потоки, приведённые к собственным значениям, соответствующим минимальной энергии накопителя.

Из анализа рис. 2.11 – 2.14 можно заключить:

1) наибольшее влияние в уменьшении основного потока (проходящего между якорем и полюсами индуктора в зазоре электромагнита и обеспечивающего возникновение силы) имеют пазовые потоки. Они имеют наибольшие значения (12 – 24 %) и не участвуют (в отличие от части потоков выпучивания) в создании силы;

2) переход к большему зазору (до 10 мм) вызывает значительный рост потоков рассеяния – на 10 % от полного потока, в итоге составляя до 33 %;

3) увеличение начальной энергии накопителя незначительно сказывается на распределении магнитного потока, а на большом зазоре (9 мм) наблюдается даже небольшое снижение потока пазового рассеяния;

4) несмотря на снижение прироста основного потока с увеличением начальной энергии накопителя (с 18 % на зазоре 4,5 мм (при $W_{Сн} = 2256$ Дж) до 14,6 % на зазоре 9,5 мм), квадратичная зависимость силы от потока оправдывает использование увеличенного зазора и увеличение форсировки (начального значения $W_{Сн}$).

2.2.4. Методика экспериментального исследования электромагнита.

Силовые импульсные электромагниты характеризуются простотой конструкции, компактностью, надежностью в работе, долговечностью, быстродействием, возможностью включения в автоматизированный процесс, именно этим и обусловлено их широкое применение.

Однако даже в настоящее время электромагнит как генератор силовых импульсов недостаточно изучен. Это связано с тем, что электромеханические процессы, рассматриваются при значительных допущениях: таких как исключение влияния потерь в стали и явления магнитного насыщения магнитопровода, спрямление нелинейной зависимости между индуктивностью электромагнита и величиной воздушного зазора. Поэтому задача создания высокоэффективного импульсного электромагнитного двигателя может быть решена наиболее успешно тогда, когда совместно с теоретическими исследованиями будут широко развернуты экспериментальные работы, совместно с которыми могут быть получены достоверные выводы и рекомендации.

Установлено, что существенное влияние на рабочий процесс двигателя оказывает большое количество параметров. Поэтому одной из важнейших задач является разработка таких теоретических и экспериментальных исследований, которые сокращали бы количество и продолжительность опытов без ущерба для качества исследований и позволили бы прояснить физику процесса непосредственного преобразования электрической энергии в механическую работу, установить общие взаимосвязи между электрическими, тепловыми и механическими параметрами ЭМД.

В реальных электромагнитных устройствах возникают разнообразные явления, связанные с преобразованием энергии. Их роль в общем процессе энергопреобразования не равнозначна. Главные составляющие энергетического баланса силовой электромагнитной импульсной системы – это потери энергии на активных сопротивлениях, потери в стали от гистерезиса и вихревых токов, потери в обмотке возбуждения от протекания импульсного тока и механическая энергия, обеспечивающая основную функцию системы – совершение механической работы.

С целью определения влияния выше указанных явлений на процесс электромеханического преобразования необходимы экспериментальные исследования ИЛЭМД сейсмоисточника. Как уже описывалось ранее (п. 2.2), электромагнитный двигатель выполнен в виде короткоходового Ш-образного

линейного электромагнита с продольным потоком, обмотка возбуждения которого состоит из двух секций, соединенных параллельно и подключенных к схеме электрического питания. Энергопреобразование в двигателе обусловлено особенностями его работы, вызванными спецификой применения в том или ином техническом устройстве, а заданный режим работы обеспечивает схема электропитания.

Следующие особенности работы ИЛЭМД в составе сейсмоисточника можно отнести к основным:

1) форсированный ввод энергии (1,5 – 2 мс) от предварительно заряженного емкостного накопителя в активную зону энергопреобразования (рабочий воздушный зазор). При этом индукция в рабочем зазоре изменяется от 0 до B_{max} - близкой к индукции насыщения стали магнитопровода (2,1 Тл), что обеспечивает максимальную для данной конструкции двигателя электромагнитную силу (в номинальном режиме 250 кН (25 тс)).

2) совершение двигателем механической работы в режиме, близком к постоянству потокосцепления;

3) полный выбор рабочего воздушного зазора с последующим ударным взаимодействием между якорем и индуктором электромагнита.

Форсированный ввод энергии обеспечивает запасание магнитной энергии в зазоре электромагнита с минимальным движением подвижных частей сейсмоисточника, а режим, близкий к постоянству потокосцепления, обеспечивает преобразование энергии, запасенной в магнитном поле, в механическую при постоянстве и максимуме развиваемой электромагнитной силы. При этом увеличение механической энергии происходит за счет уменьшения энергии магнитного поля рабочего зазора.

Основными величинами, которые необходимо измерять в приводимой здесь методике экспериментального исследования являются электрический ток обмотки и магнитный поток одного из полюсов электромагнита. На рис. 2.15 приведены типичные осциллограммы тока обмотки и потока секции обмотки.

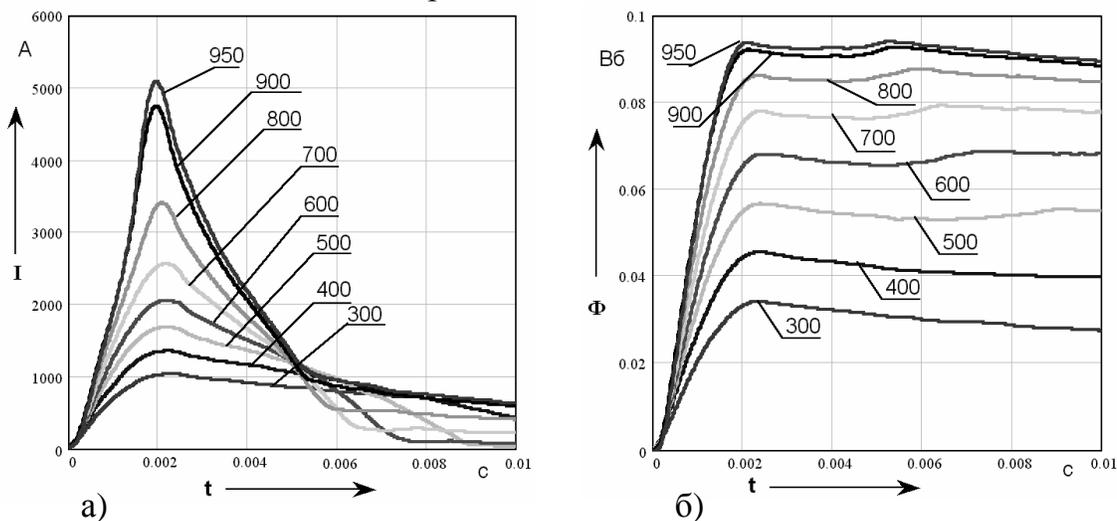


Рис. 2.15. Характерные временные зависимости тока обмотки возбуждения (а) и потока полюса (б) при постоянном зазоре и изменении напряжения емкостного накопителя.

Они позволяют определить время выбора рабочего зазора (интервал времени от момента максимума тока до момента перехода тока на затухание с большой постоянной времени), индукцию в рабочем зазоре (отношение амплитудного значения потока к известной площади активных полюсов) и оценить степень насыщения магнитопровода электромагнита при изменении степени форсировки.

Однако, как уже упоминалось выше, основная функция привода – совершение механической работы, а это является энергетической характеристикой электромеханической машины, поэтому процессы энергопреобразования полезнее рассматривать на снятых экспериментально ЭД – зависимостях $\Psi(I)$. Энергетические диаграммы (рис. 2.16), снятые для электромагнитного привода в динамике и статике (режим "заторможенного" якоря, когда механическая работа не совершается), позволяют оценить величину механической энергии и ее изменение при различных степенях форсировки магнитного поля.

Так как площадь петли в динамическом режиме пропорциональна сумме совершаемой приводом механической работы и потерям в стали магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов, а площадь петли в статическом режиме пропорциональна только суммарным потерям в стали (благодаря специфике реализуемого режима работы), то появляется возможность выделить в динамическом режиме только механическую энергию, идущую на совершение механической работы. Это позволяет в дальнейшем с высокой степенью точности определить величину развиваемой приводом электромагнитной силы, а также оценить КПД энергопреобразования как отношение полезной механической энергии к энергии, запасаемой емкостным накопителем.

Проведённые (см. п.п. 4.1) на основании данной методики экспериментальные исследования ИЛЭМД при изменении рабочего воздушного зазора и степени форсировки магнитного поля позволили определить с высокой степенью достоверности основные составляющие энергетического баланса. На основании полученных результатов исследования можно делать следующий ряд выводов о влиянии выше указанных факторов на энергопреобразование:

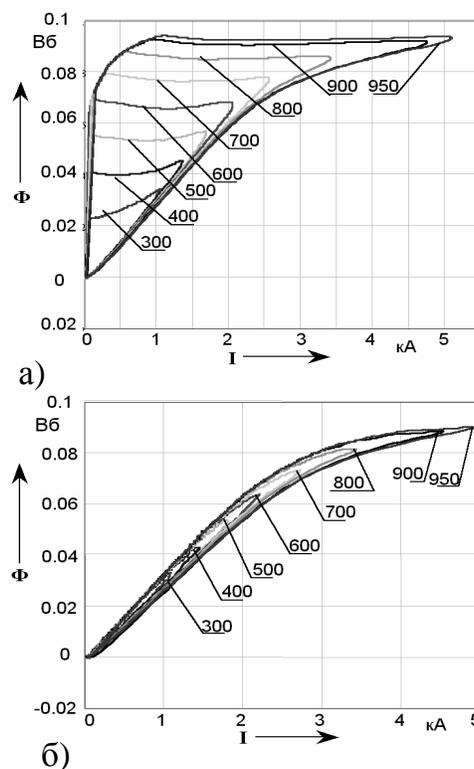


Рис. 2.16. Энергетические диаграммы импульсного электромагнитного двигателя в динамическом (а) и статическом (б) режимах при изменении степени форсировки.

1) определение потерь в стали в зависимости от различных параметров и при различных режимах работы электромеханической системы, а также изменение потерь в стали с изменением степени форсировки магнитного поля;

2) определение потерь в обмотке возбуждения в зависимости от различных параметров и при различных режимах работы электромеханической системы. Кроме того, можно оценить временные рамки наибольшего проявления этих потерь и факторы, определяющие их величину.

3) определение доли энергии (от запасенной в емкостном накопителе), идущей на осуществление основной функции системы – совершение механической работы. Выявление зависимостей величины энергии от различных параметров (величины зазора, степени форсировки) и режимов работы электромеханической системы.

Таким образом, описанная здесь методика позволяет не только определять энергетический баланс в электромеханической системе с учётом потерь, но и оценивать влияние на него различных факторов (параметров системы и режимов работы), а значит – выработать рекомендации по совершенствованию электромагнитного привода сейсмоисточника. Характерным является также то, что фактически измеряемых величин всего две и их получение просто и не требует значительных затрат на специальное измерительное оборудование.

В [60] приведён пример применения описанной здесь методики в экспериментальном исследовании импульсного электромагнитного привода наземного сейсмоисточника "Енисей"–СЭМ.

Результаты лабораторных испытаний ИЛЭМД водного сейсмоисточника и выводы, полученные по ним с применением описанной методики приведены ниже, в параграфе 4.1.

2.3. Схемы питания

Полевые условия, как особенность проведения сейсморазведочных работ, накладывают на все системы сейсмоисточника повышенные требования надёжности, эффективности и простоты в работе. С учётом этих требований сформулируем задачи для схемы электрического питания сейсмоисточника. Она должна обеспечивать:

- питание особой, импульсной нагрузки – линейного электромагнитного привода;
- заданное время подготовки воздействия;
- экономичное и эффективное использование источников первичной энергии;
- своевременность срабатывания, требующуюся для синхронизации работы сейсмоисточников при их группировании;
- устойчивость схемы к возникновению аварийных режимов;
- простоту и надёжность в эксплуатации и ремонте.

Наиболее подходящим из известных источников импульсной энергии, для использования в решении указанных задач, являются электрические накопители энергии – конденсаторы. Существование хорошо развитой схемотехники зарядных и разрядных устройств предполагает первоочередную возможность *выбора* из существующих схемных решений. Поэтому, именно с обоснования выбора схемы заряда и начинается этот параграф, посвященный системе питания водного импульсного электромагнитного сейсмоисточника.

2.3.1. Обоснование выбора схемы заряда емкостного накопителя.

В настоящее время схемы обеспечивающие заряд емкостных накопителей энергии многообразны и различаются между собой по множеству классификационных признаков [61 – 64]. Множество решений задачи заряда емкостного накопителя можно объяснить тремя причинами. Во-первых, подобная задача начала активно рассматриваться разработчиками уже давно – примерно с середины прошлого века, что позволило накопить множество подходов, решений, критериев оптимизации. Во-вторых, наблюдающееся бурное развитие элементной базы электронных устройств сделало доступными сложные алгоритмы управления и новые области применения емкостных накопителей энергии, а значит и схем их заряда. И, в-третьих, что следует из двух уже указанных причин, электроника в общем, и схемотехника зарядных устройств в частности, стали способны удовлетворять очень широкому диапазону количественных и качественных параметров, характеризующих зарядные процессы.

Поэтому, представляется удобным, для выделения наиболее подходящих решений из всего множества типов схем заряда, соотнести классификационные характеристики с имеющимися техническими требованиями и условиями (ТТиУ) (табл. 2.2).

Таблица 2.2.

Технические требования и условия для проектирования схемы заряда емкостного накопителя энергии водного сейсмоисточника

Требования и условия	Количественные значения и/или примечания	
	значение	примечание
1	2	3
1. Первичный источник энергии	3 ^x фазный асинхронный дизель-генератор	так как можно использовать генераторы уже имеющиеся в наличии в сейсмопартии и питающие сейсмостанцию, радиоаппаратуру, осветительные приборы
2. Максимальное время заряда, с	3-6	значение обусловлено продолжительностью паузы между воздействиями для приёма обратных сейсмических сигналов
3. Ёмкость конденсаторной батареи, Ф	$(1..5) \times 10^{-3}$	величина прямо пропорционально определяет энергию воздействия; верхний порог может быть ограничен конструктивными соображениями (ростом габаритов) или достаточностью амплитуд получаемых акустических сигналов

1	2	3
4. Максимальное напряжение заряда, В	950	величина определяет энергию воздействия в квадрате; как правило выбирается в пределах 1000 В, для снижения класса опасности по условиям техники безопасности
5. Точность стабилизации уровня напряжения, %	1	высокая точность стабилизации напряжения необходима для высокой повторяемости характеристик сейсмических воздействий, являющейся требованием методики проведения сейсморазведочных работ
6. КПД заряда, %	не менее 70	влияет на время заряда, максимальный предел которого ограничен, поэтому определяет габаритные и стоимостные характеристики
7. Простота и надёжность в эксплуатации и ремонте	–	качественная характеристика, которая может быть оценена, количеством и типом применяющихся силовых приборов; сложностью алгоритма и схемы управления; простотой и доступностью монтажа и т.д.
8. Стоимость и массогабаритные показатели	–	так как сам сейсмоисточник заведомо существенно превосходит по этим показателям систему питания, то приоритет их учёта низок

С учётом высокого приоритета требования 7 (табл. 2.2) предполагался первичным поиск решения в классе устройств без регулирования процесса заряда. При этом, возможно, получающиеся показатели процесса заряда (КПД, использование первичного источника энергии) будут ниже. Кроме того, без регулирования процесса заряда утрачивается способность схемы реагировать на различные изменения внешних факторов (например, изменение напряжения первичного источника питания (ПИП)). Но, как будет показано ниже, в выбранной классификационной группе есть решения позволяющие обеспечить приемлемые показатели процесса заряда и функциональную достаточность его невысокой управляемости. Регулируемость процесса заряда в предлагающемся решении будет заключаться не в сквозном вмешательстве в формирование временных зависимостей на всём процессе заряда, а всего в двух случаях. Во-первых, при задании уровня напряжения, до которого должен быть заряжен накопитель, что может быть выполнено через пассивное управление процессом заряда. И, во-вторых, включением дозаряда уже после основного зарядного процесса. Необходимость дозаряда следует из противоречия требования 5 (табл. 2.2) обязательному наличию тока утечки, причём не только тока в самом ёмкостном накопителе, но и в необходимых, по технике безопасности, разрядных резисторах.

Использование зарядных устройств с жёсткой выходной характеристикой преобразователей усложняет выполнение требования точности поддержания напряжения на ёмкостном накопителе (п. 5, табл. 2.2). Это объясняется постоянной мощностью заряда накопителя от нулевого до заданного напряжения. Другим фактором, снижающим привлекательность использования

устройств заряда с жёсткой выходной характеристикой является то, что для преобразования переменного напряжения (п. 1, табл. 2.2) в постоянное и согласования его уровней (п.1 и п. 4, табл. 2.2) необходимо использование нестандартного трансформатора. Последнее противоречит требованию высокой ремонтпригодности (п. 7, табл. 2.2) и усложняет изготовление системы питания.

Таким образом, предпочтительным является использование схем, во-первых, без сквозного регулирования процесса заряда, но с дозарядом и возможностью задания уровня напряжения на накопителе; во-вторых, с дозаторами энергии.

За основу построения системы питания водного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом была выбрана простейшая схема удвоения – схема Латура (рис. 2.17). Выбор схемы Латура помимо вышеприведённых соображений был также обусловлен сочетанием следующих её достоинств.

1). Очевидная простота схемы, следующая из небольшого количества стандартных элементов и несложной топологии.

2). Схема обеспечивает дозированную передачу энергии, причём с уменьшением её в конце заряда. Это позволяет обеспечить простую и точную систему стабилизации напряжения на накопителе (п. 5, табл. 2.2).

3). Схема (рис. 2.17) допускает использование в качестве ПИП трёхфазного генератора. При этом такая схема собирается для каждой из фаз, а работа фаз происходит независимо друг от друга.

4). Схема позволяет выполнять заземление как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора.

5). Просто реализуется регулировка заряда (ограничение по заданному напряжению и дозаряд). Для этого необходимо вместо диода VD1 поставить управляемый полупроводниковый ключ.

6). Как будет показано далее, около двух третей процесса заряда происходит при непрерывном токе с большой постоянной составляющей. Это является достоинством схемы [см. например, 62, с. 11; 64, с. 18], заключающемся в высоком КПД зарядного контура.

На рис. 2.18 представлена трёхфазная схема заряда ёмкостного накопителя энергии с ёмкостным токоограничением. В ней $C_{зар}$ – ёмкостный накопитель энергии; $C1_A, C1_B, C1_C$ – токоограничивающие конденсаторы; $VD1_A, VD1_B, VD1_C$ – зарядные вентили токоограничивающих конденсаторов; $VD2_A, VD2_B, VD2_C$ – зарядные вентили ёмкостного накопителя.

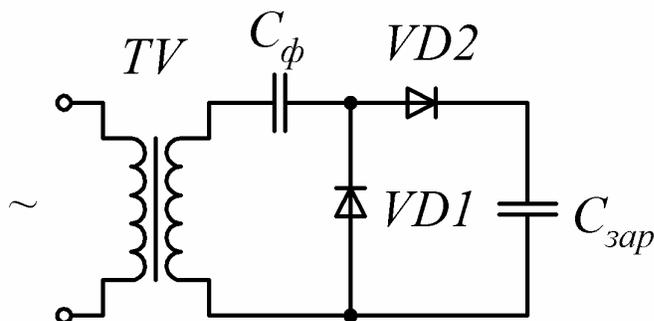


Рис. 2.17. Схема удвоения напряжения (схема Латура).

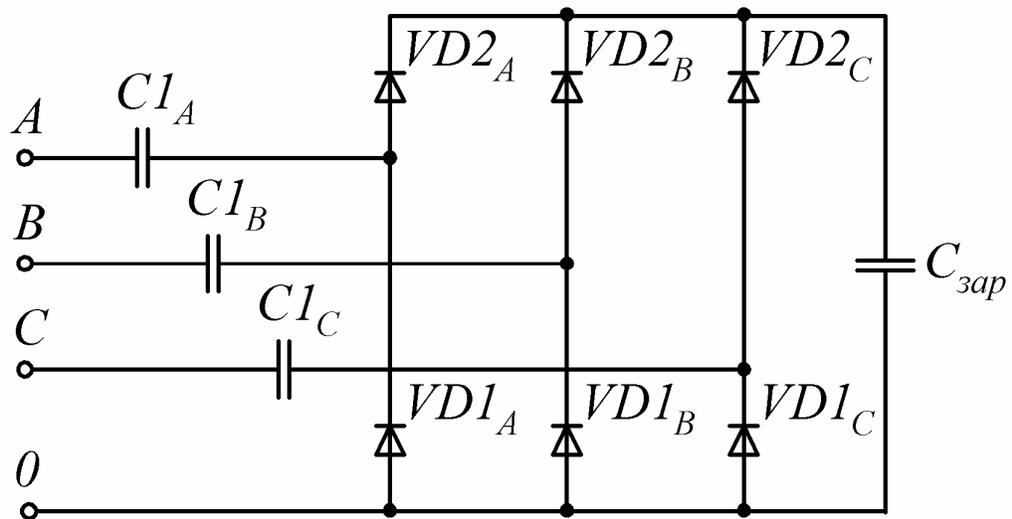


Рис. 2.18. Трёхфазная схема удвоения напряжения для заряда ёмкостного накопителя энергии.

Эта схема в отличие от однофазной схемы (рис. 2.17) позволяет обеспечить хорошее использование по мощности синхронного генератора (с фазным напряжением 220 В), помещённого на транспортном средстве, и получить максимальное напряжение на накопительном конденсаторе 600 В, без применения повышающего трансформатора. Кроме этого, схема не чувствительна к коротким замыканиям на выходе и, как уже упоминалось ранее, позволяет заземлять источник питания и ёмкостный накопитель. Представленная схема не содержит активных сопротивлений и поэтому КПД её достаточно высокий (может достигать 98%). Все выше перечисленные достоинства данной схемы явились основными причинами при выборе её в качестве зарядного устройства (ЗУ) ёмкостного накопителя энергии в системе питания импульсных и кодоимпульсных [65] сейсмоисточников с электромагнитным и индукционно-динамическим приводом.

Следует отметить, что для повышения мобильности сейсмоисточника и исключения шумов от дизель-генератора, возможно использование схем заряда ёмкостного накопителя работающих на автомобильном аккумуляторе как источнике первичной энергии. Для активного применения таких схем необходимы данные практических исследований на промышленных образцах водных сейсмоисточников об объёмах, требующегося для приемлемой сейсмической эффективности, группирования сейсмоисточников. При этом станет возможным расчёт потребностей обслуживания аккумуляторов (заряд, транспортировка) и, соответственно, практическая целесообразность такого решения.

2.3.2. Особенности схемы электропитания водного сейсмоисточника с электромагнитным приводом.

Имеющиеся данные [65, 66] по исследованию схемы заряда, неся значительную информацию по работе схемы и расчёту её элементов, имеют

узкую направленность и определённую ограниченность. Информация о данных экспериментальных исследований весьма скудна, а гибкие средства математического описания в виде математических моделей отсутствуют. Поэтому в данном параграфе приведены результаты натурных и машинных исследований восполняющие существующие пробелы в изучении особенностей и возможностей представленной схемы.

Упрощённо схема системы питания изображена на рис. 2.19.

Питание установки осуществляется от трёхфазной сети переменного тока с фазным напряжением 220 В. Для защиты от токов короткого замыкания и отключения установки от сети переменного тока предусмотрен автоматический выключатель QF. Далее по схеме установлена "нулевая защита" собранная на реле-пускателе КМ и кнопках "Пуск" и "Стоп". Для начального изложения принципа работы схемы рассматривается лишь её часть (подключённая к одной фазе), так как параметры элементов во всех трёх фазах одинаковы, различен только сдвиг фаз токов и напряжений на определенных участках схемы.

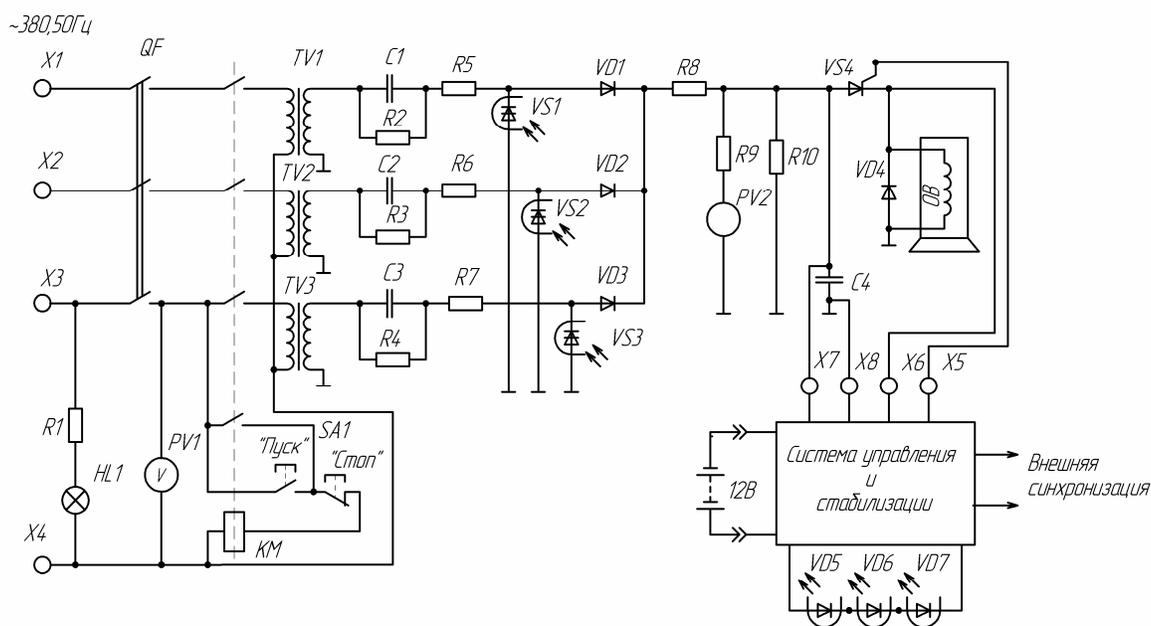


Рис. 2.19. Упрощенная схема системы питания электромагнитного привода водного сейсмоисточника.

Особенности совместной работы фаз будут отмечены отдельно.

Одна фаза схемы заряда изображена на рис. 2.20. Как уже упоминалось ранее, в основу ЗУ заложен принцип удвоения напряжения реализованный на схеме Латура (рис. 2.17).

Трансформатор TV1 выполняет одновременно две функции: повышение напряжения (с коэффициентом 1,727) до необходимого уровня и гальванической развязки схемы питания от сети переменного тока. Конденсатор С1 (рис. 2.20) является токоформирующим элементом схемы, основная его задача – это ограничение зарядного тока до необходимого уровня, так же благодаря нему происходит удвоение напряжения на накопительном конденсаторе С4. Ограничение тока происходит из-за реактивного

сопротивления конденсатора C1. На рис. 2.21 приведена осциллограмма

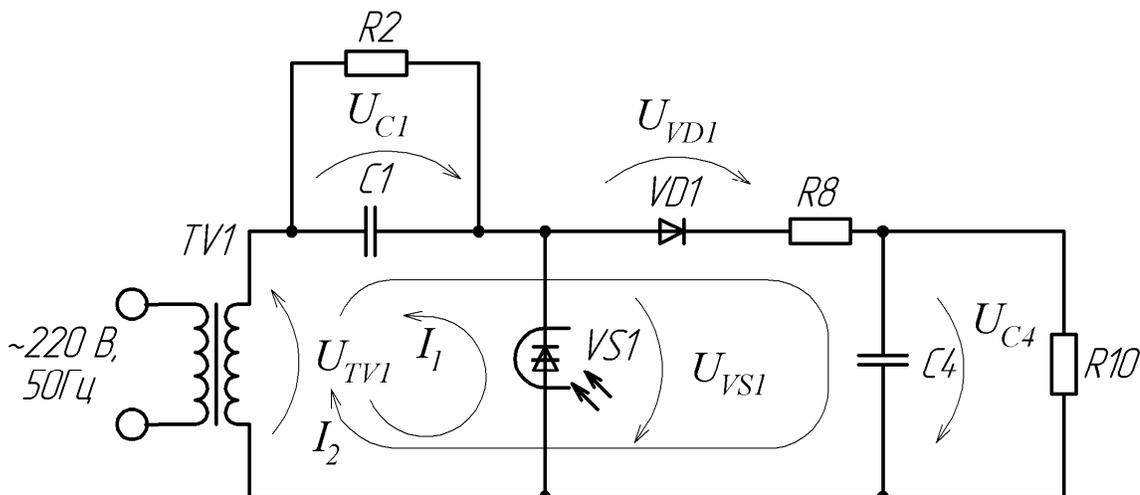


рис. 2.20. Одна фаза схемы заряда с обозначенными значениями напряжения и токами.

напряжения на конденсаторе C1, при заряде накопителя до напряжения 700 В. Как видно из осциллограммы, положительная огибающая напряжения на конденсаторе экспоненциально убывает, это связано с ростом напряжения на накопительном конденсаторе C4 (рис. 2.20).

Для получения осциллограмм токов в интересующей цепи включали шунт. Падение напряжение на шунте прямо пропорционально протекающему через него току, поэтому значение тока определяли с помощью выражения:

$$I = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} \quad (2.11)$$

где $U_{ш}$ – падение напряжения на шунте, В;

$R_{ш}$ – сопротивление шунта, Ом; $R_{ш}=0,0025$ Ом.

Далее на всех осциллограммах будут отображаться значения тока, полученные с учётом выражения 2.11.

Осциллограмма тока конденсатора C1 приведена на рис. 2.22. Осциллограмма показывает, что действующее значение тока в процессе заряда изменится незначительно, а это свидетельствует о равномерной токовой нагрузке, как на элементы схемы, так и на сеть питания в целом. Вышеизложенный фактор способствовал выбору данной схемы удвоения напряжения.

Резистор R2 (рис. 2.20) предназначен для снятия остаточного напряжения на конденсаторе C1, путём разряда с большой постоянной времени после отключения установки от источника питания. Поэтому влияние резистора R2 на процесс заряда является незначительным.

Для формирования тока заряда одной полярности в схеме предусмотрен выпрямитель, построенный на диоде VD1. Осциллограмма напряжения на диоде VD1 показана рис. 2.23. Обратное напряжение на диоде растёт по мере заряда накопительного конденсатора C4, так как последний подключён к катоду диода (рис. 2.20). Ток, протекающий через диод (рис. 2.24) равен току разряда токоформирующего конденсатора C1 (рис. 2.22) и является зарядным

током накопительного конденсатора С4. Тиристор VS1 (рис. 2.20) предназначен для перезаряда токоформирующего конденсатора С1 в то время, когда к его аноду приложено положительное напряжение с обмотки трансформатора TV1. Ток I_1 (рис. 2.20) при этом начинает протекать по цепи TV1-VS1-C1-TV1.

В момент времени, когда к аноду тиристора VS1 прикладывается отрицательное напряжение с обмотки трансформатора TV1, он закрывается, при этом ток I_2 (рис. 2.20) протекает по цепи TV1-C1-VD1-R8-C4-TV1. Эффект удвоения напряжения на накопительном конденсаторе С4 объясняется суммированием напряжения на обмотке трансформатора TV1 и напряжения на токоформирующем конденсаторе С1.

На осциллограмме рис. 2.25 наблюдается возрастание амплитуды прикладываемого к тиристорному обратного напряжения, объясняющееся тем, что это напряжение соответствует возрастающему напряжению на конденсаторе С4.

Как видно из осциллограммы тока через тиристор VS1 (рис. 2.26) средние токи диода VD1 и тиристора VS1 равны, объясняется это тем, что они поочередно подключаются к токоформирующему конденсатору С1 и обмотке трансформатора TV1 с одинаковым интервалом времени. Иллюстрацией предложенного объяснения является расчётная диаграмма изображённая на рис. 2.27.

Резистор R9 предназначен для снятия остаточного напряжения на конденсаторе С4, путём разряда с большой постоянной времени после отключения установки от источника питания. Его влияние в основном процессе заряда также незначительно.

Режим стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе С4 можно наблюдать на рис. 2.28. Как видно из осциллограммы, конденсатор заряжается до определённого напряжения (в данном случае до 700 В). При превышении напряжения на накопительном конденсаторе происходит отключение тока заряда. Функцию отключения тока выполняет тиристор VS1. В момент времени, когда напряжение на конденсаторе превысит заданный уровень, прекращается подача управляющих импульсов на тиристор VS1. При закрытии тиристора VS1 разрывается цепь перезаряда токоформирующего конденсатора С1, что приводит к прекращению зарядного тока (рис. 2.29).

В зависимости от характера зарядного тока ёмкостного накопителя С4 весь процесс его заряда можно разбить на два этапа [65, 66]: 1) режим непрерывного тока заряда; 2) режим прерывистого тока заряда.

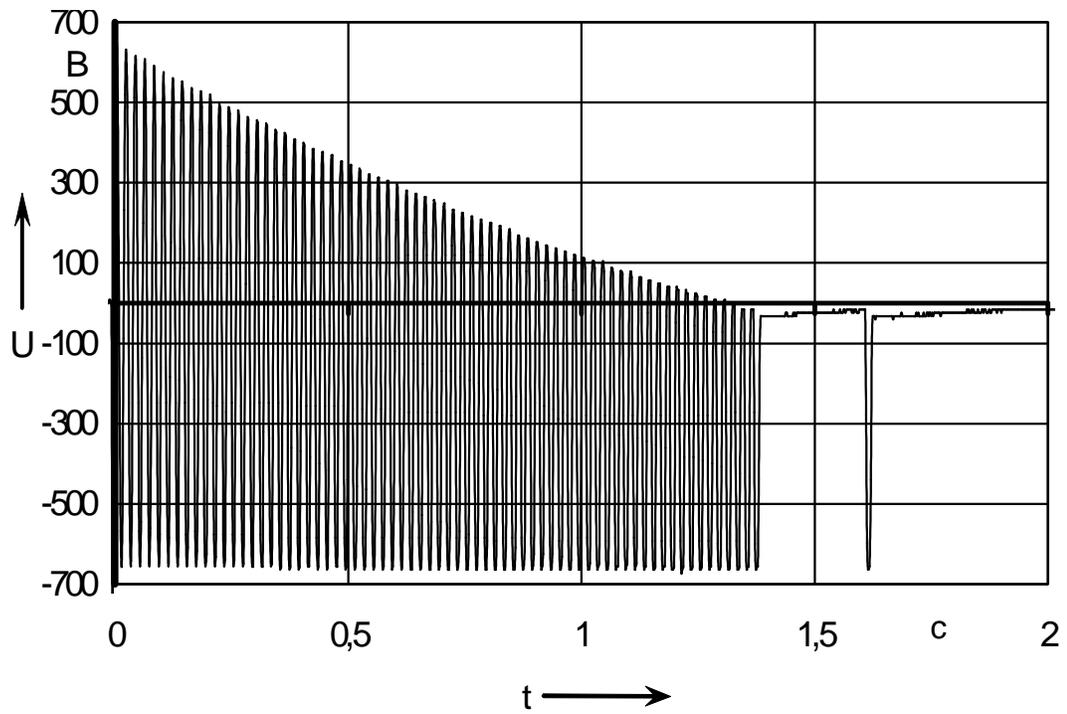


Рис. 2.21. Осциллограмма напряжения на конденсаторе C1.

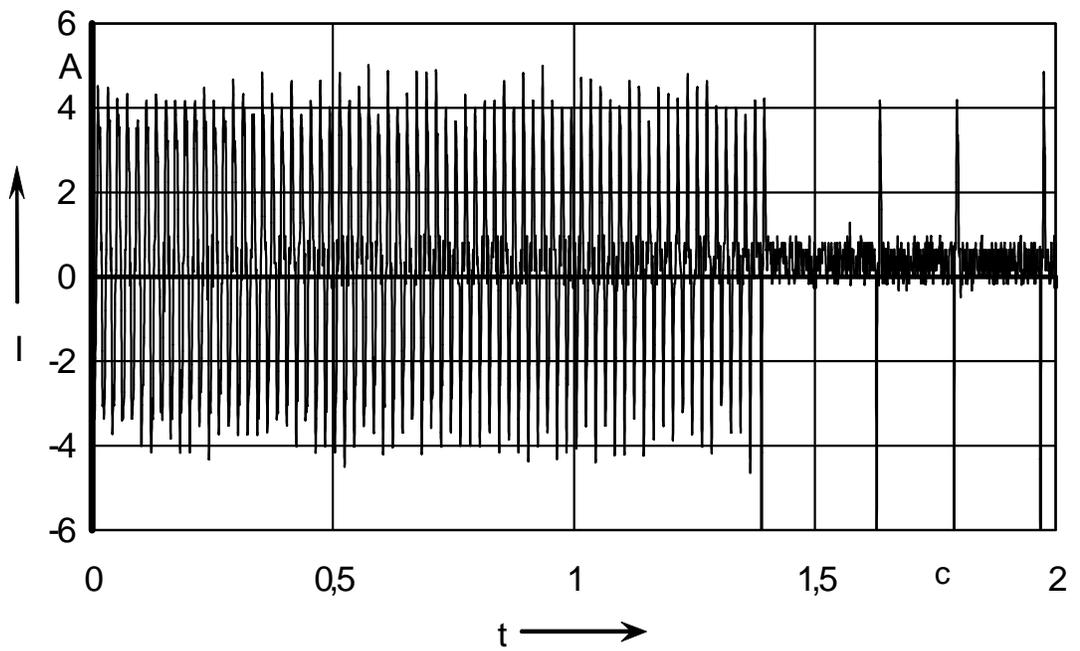


Рис. 2.22. Осциллограмма тока конденсатора C1.

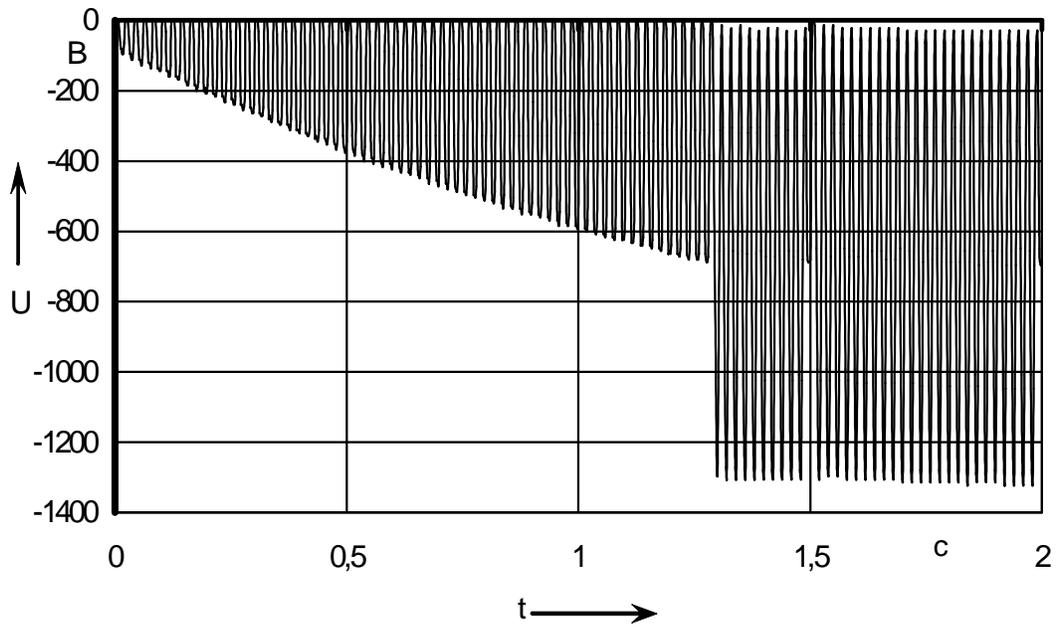


Рис. 2.23. Осциллограмма напряжения на диоде VD1.

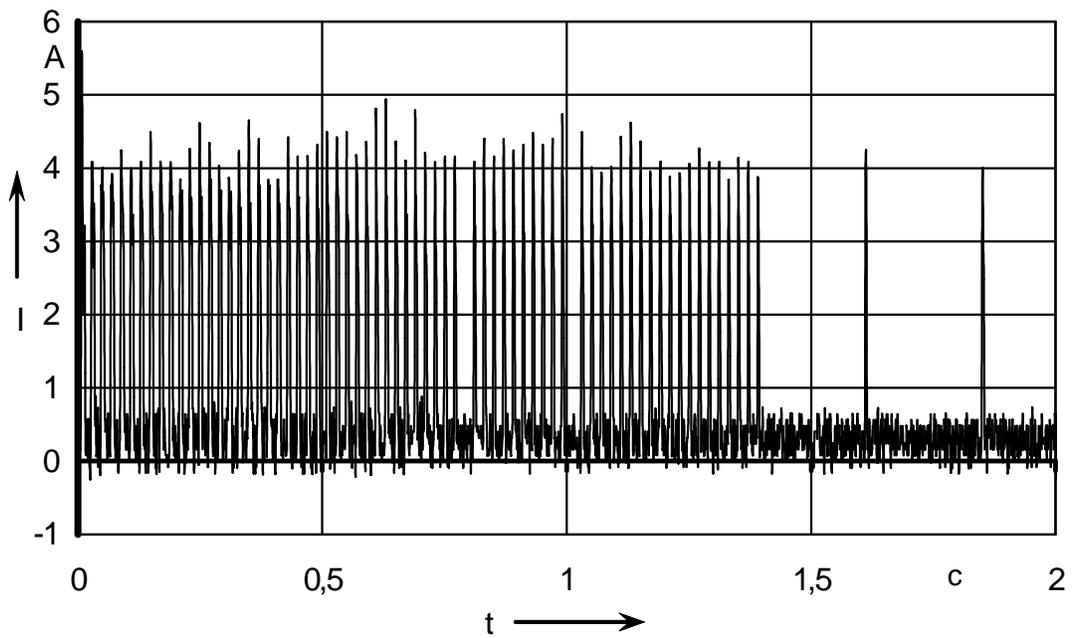


Рис. 2.24. Осциллограмма тока диода VD1.

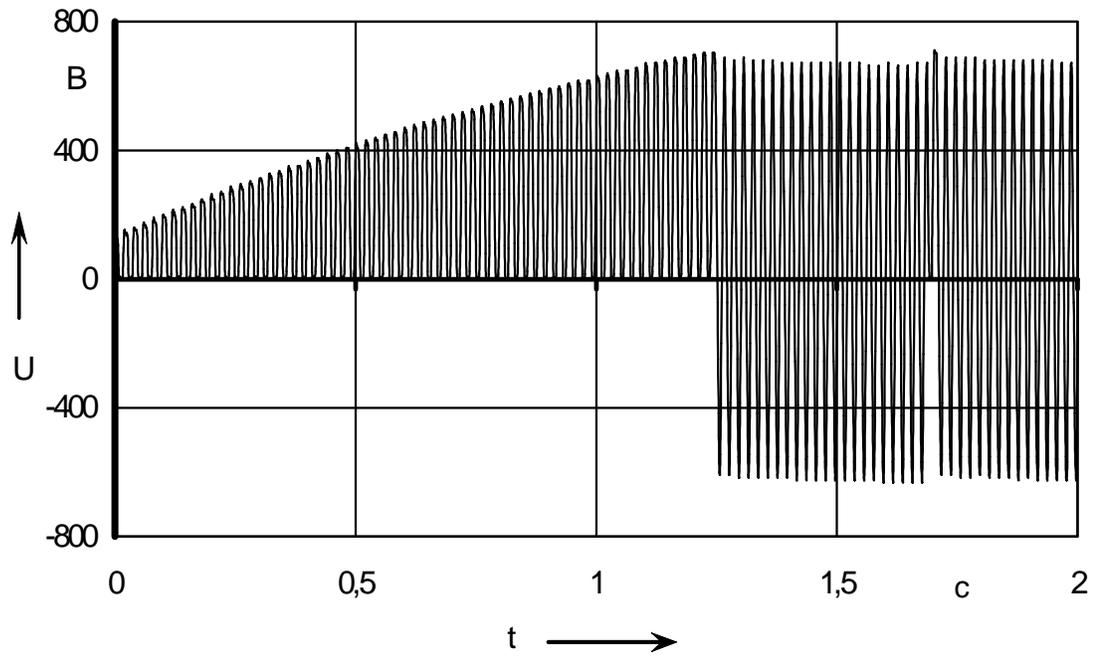


Рис. 2.25. Осциллограмма напряжения на тиристоре VSI.

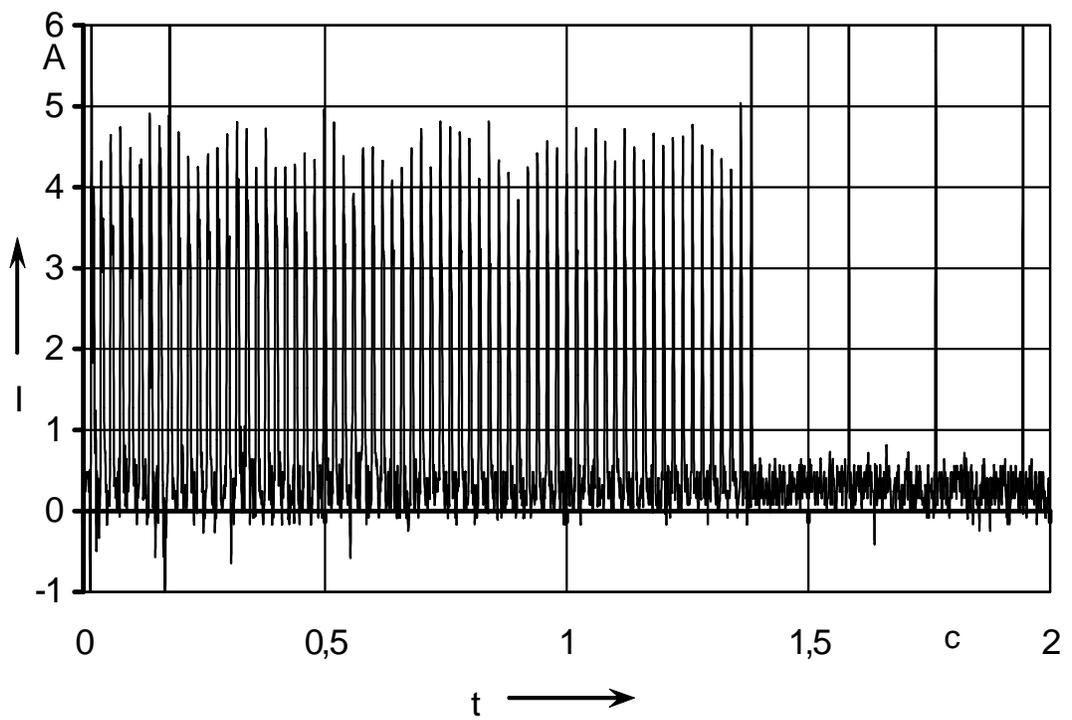


Рис. 2.26. Осциллограмма тока тиристора VSI.

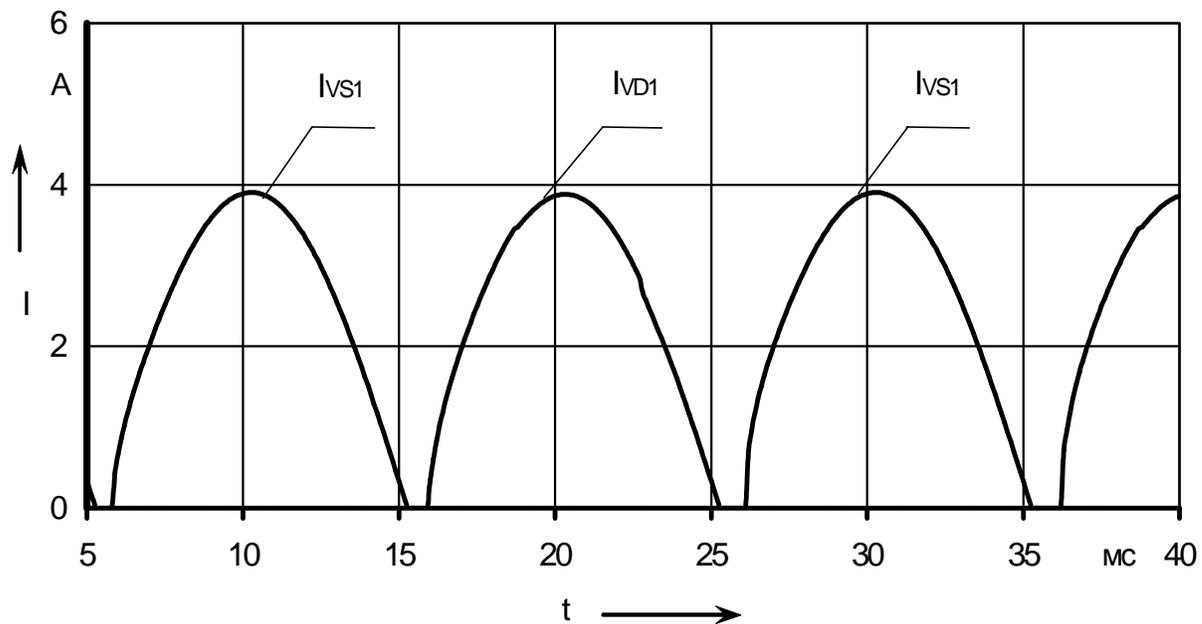


Рис. 2.27. Расчетная диаграмма токов полупроводниковых приборов одной фазы.

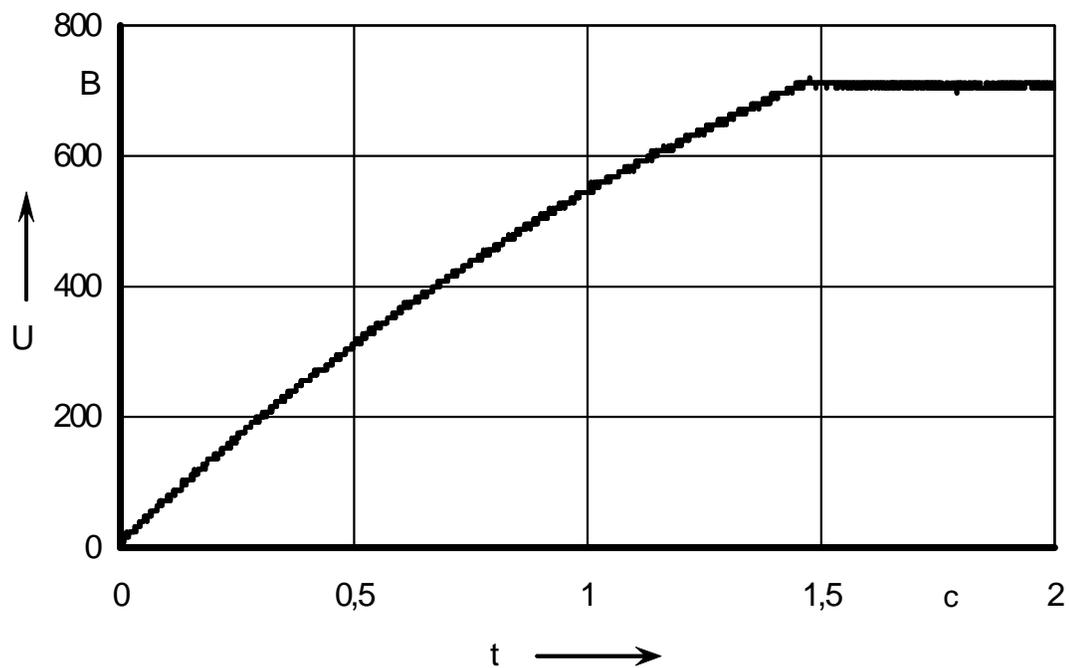


Рис. 2.28. Осциллограмма напряжения на накопительном конденсаторе.

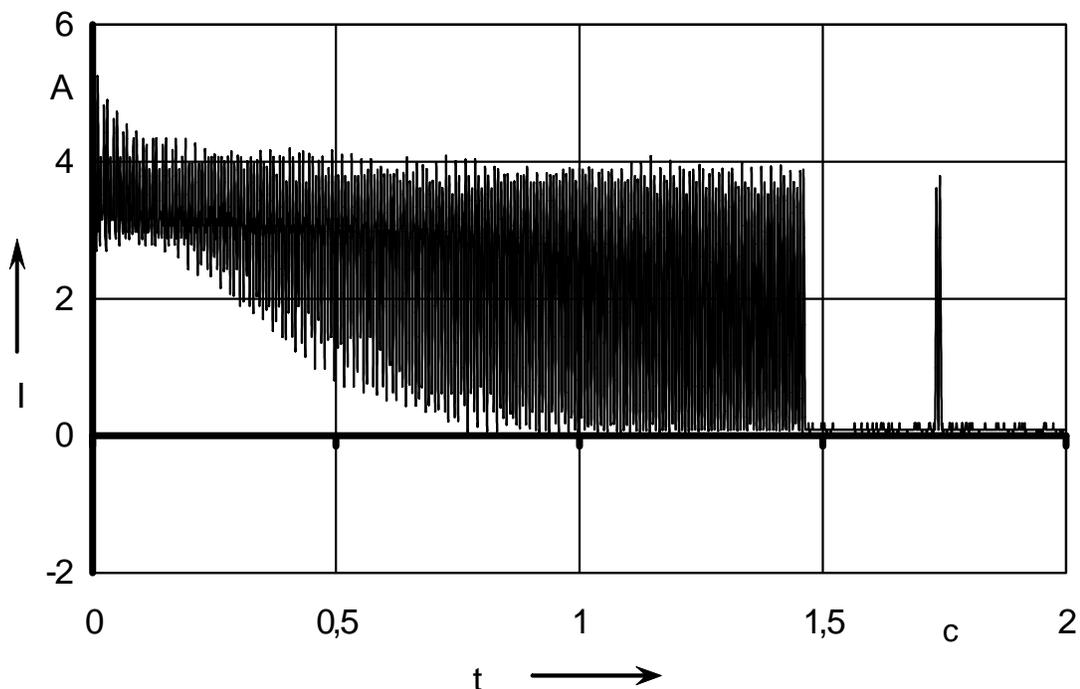


Рис. 2.29. Осциллограмма тока заряда накопительного конденсатора.

В режиме непрерывного тока заряд накопителя С4 происходит непрерывно, токи отдельных фаз (протекающие через диоды VD1-VD3) поочерёдно сменяют друг друга (рис. 2.30) и имеют периодичный характер. Разделим период протекания зарядного тока на два участка: первый – участок совместного формирования зарядного тока двумя фазами (зарядный ток при этом равен алгебраической сумме токов двух активных фаз), на рис. 2.30 и рис. 2.31 это – участок определён интервалом времени $t_1 - t_2$ и второй – участок формирования зарядного тока одной фазой, на рис. 2.30 и рис. 2.31 соответствует интервалу времени $t_2 - t_3$.

В режиме прерывистого тока между токами отдельных фаз существуют паузы (рис. 2.32), в течении которых напряжение на накопительном конденсаторе остаётся постоянным. Ток заряда при этом формируется только током одной из фаз (рис. 2.32 и рис. 2.33).

Рассмотрим механизм формирования прерывистого тока заряда накопительного конденсатора С4, для этого нам понадобится поясняющая диаграмма изображённая на рис. 2.32. Когда напряжение на аноде одного из диодов VD1-VD3 превышает напряжение на накопительном конденсаторе С4, он открывается и через него протекает ток заряда (рис. 2.33). Если напряжение на аноде одного из диодов VD1-VD3 меньше напряжения на накопительном конденсаторе С4, он закрывается и ток заряда через него прекращается (см. рис. 2.33). Как видно из диаграммы напряжений (рис. 2.34), диод VD1 закрывается раньше момента открытия сменяющего его диода VD3, что приводит к возникновению токовой паузы (рис. 2.33), напряжение на конденсаторе С4 в

момент возникновения токовой паузы остаётся постоянным. На поясняющей диаграмме (рис. 2.34) определено пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$. Пороговое напряжение это такое напряжение на накопительном конденсаторе $C4$, при котором возникает прерывистый ток заряда. В исследуемой схеме $U_{\text{пор}}$ приблизительно равно 490 В.

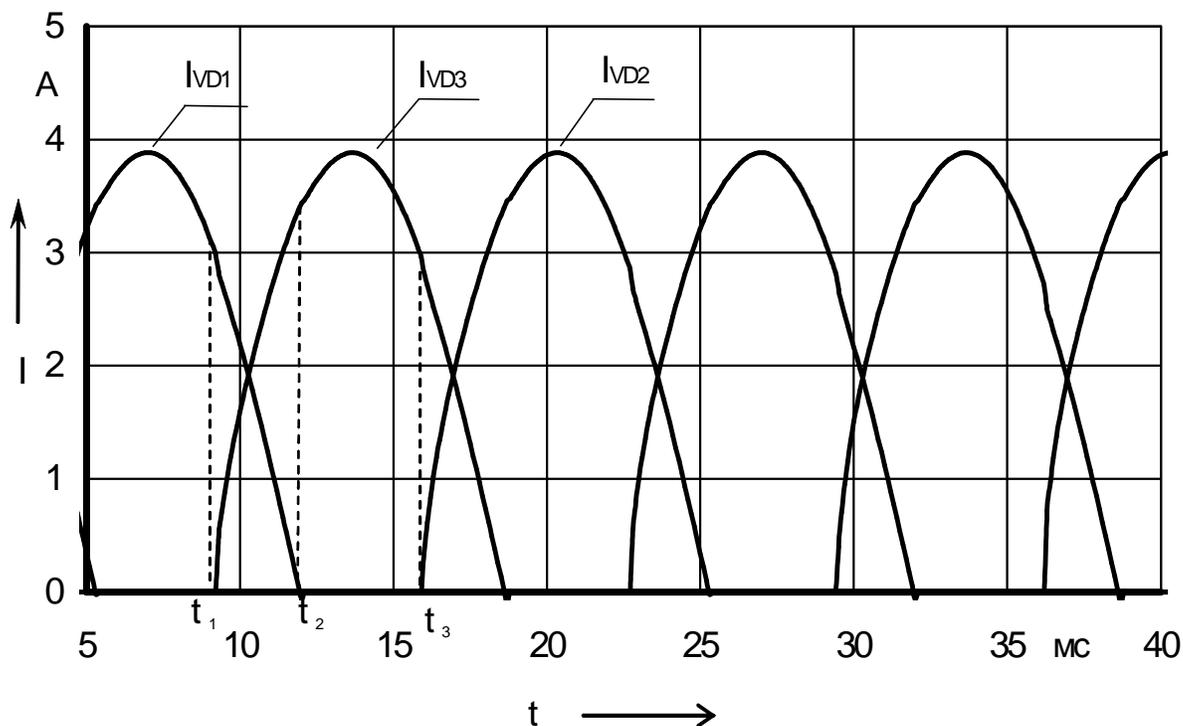


Рис. 2.30. Расчетная диаграмма токов диодов в начале заряда.

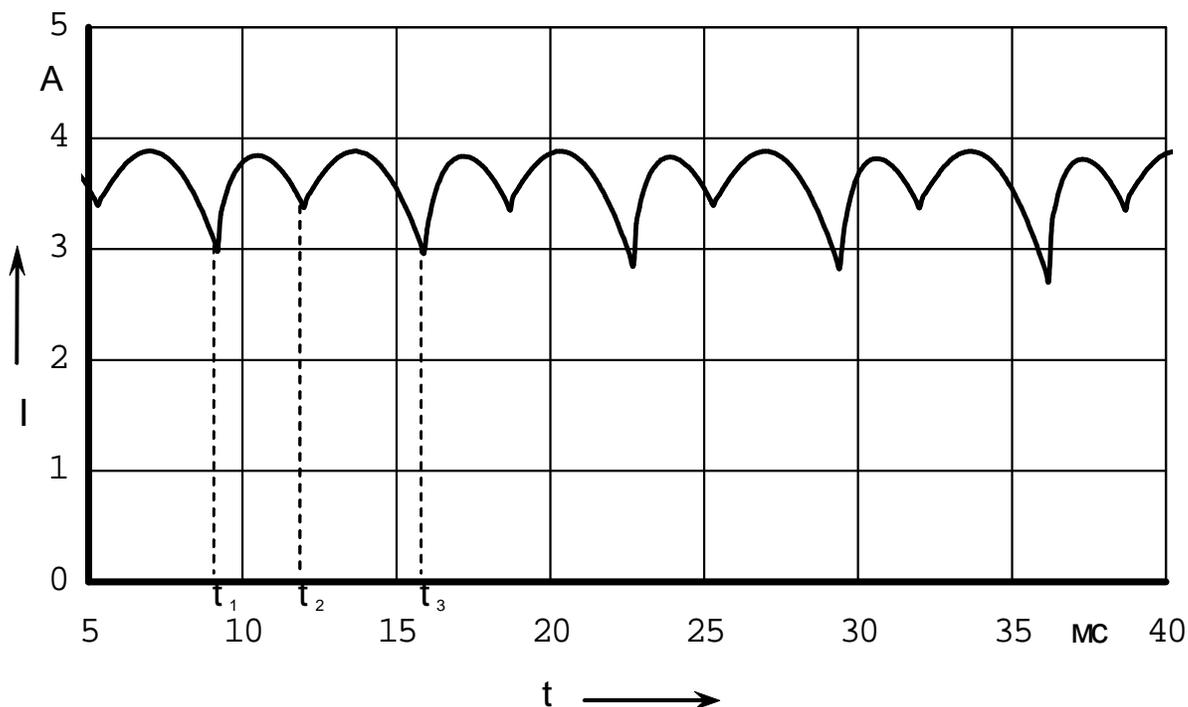


Рис. 2.31. Расчетная диаграмма тока конденсатора $C4$ в начале заряда.

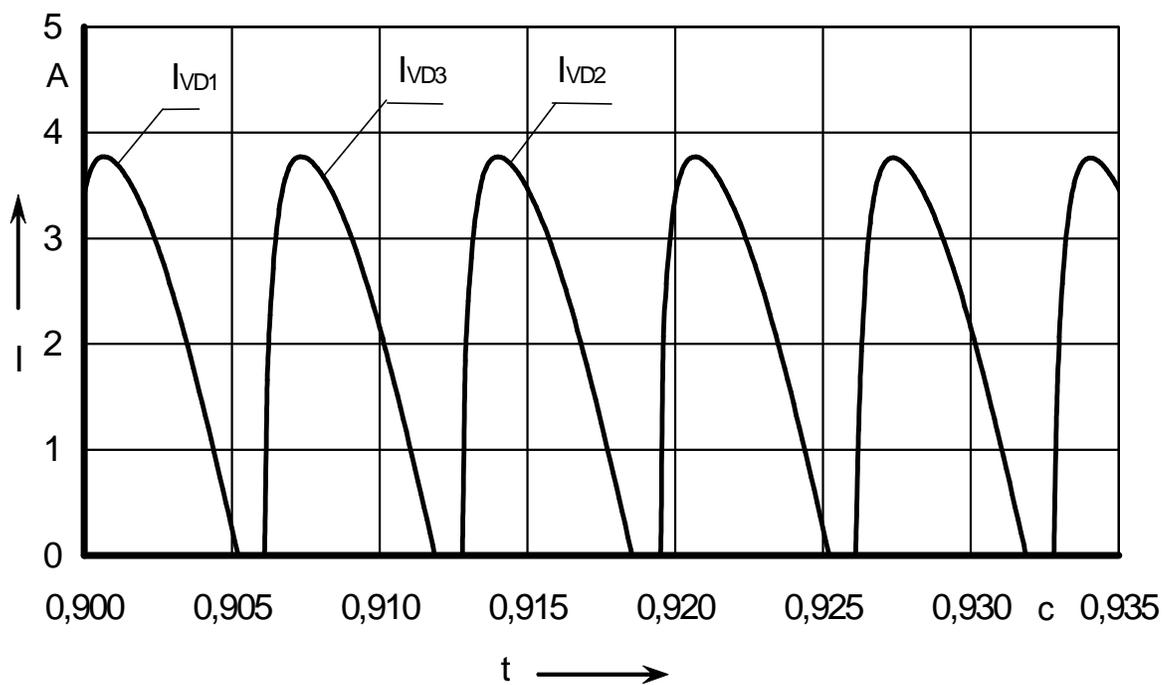


Рис. 2.32. Расчетная диаграмма токов диодов в конце заряда.

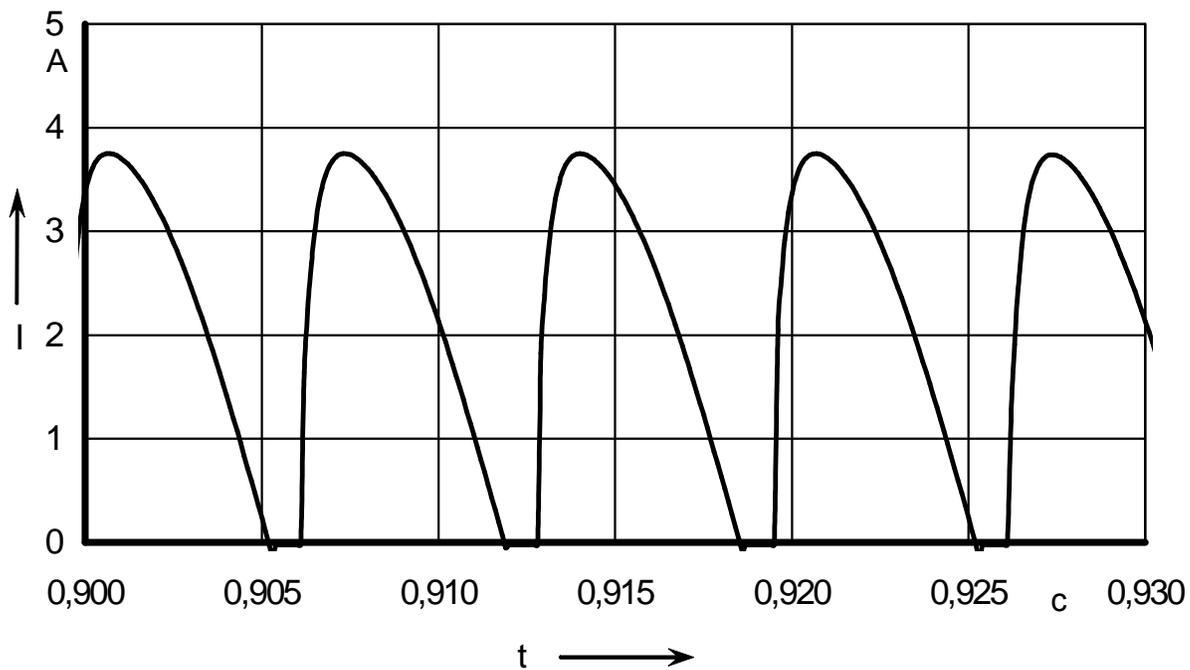


Рис. 2.33. Расчетная диаграмма тока конденсатора $C4$ в конце заряда.

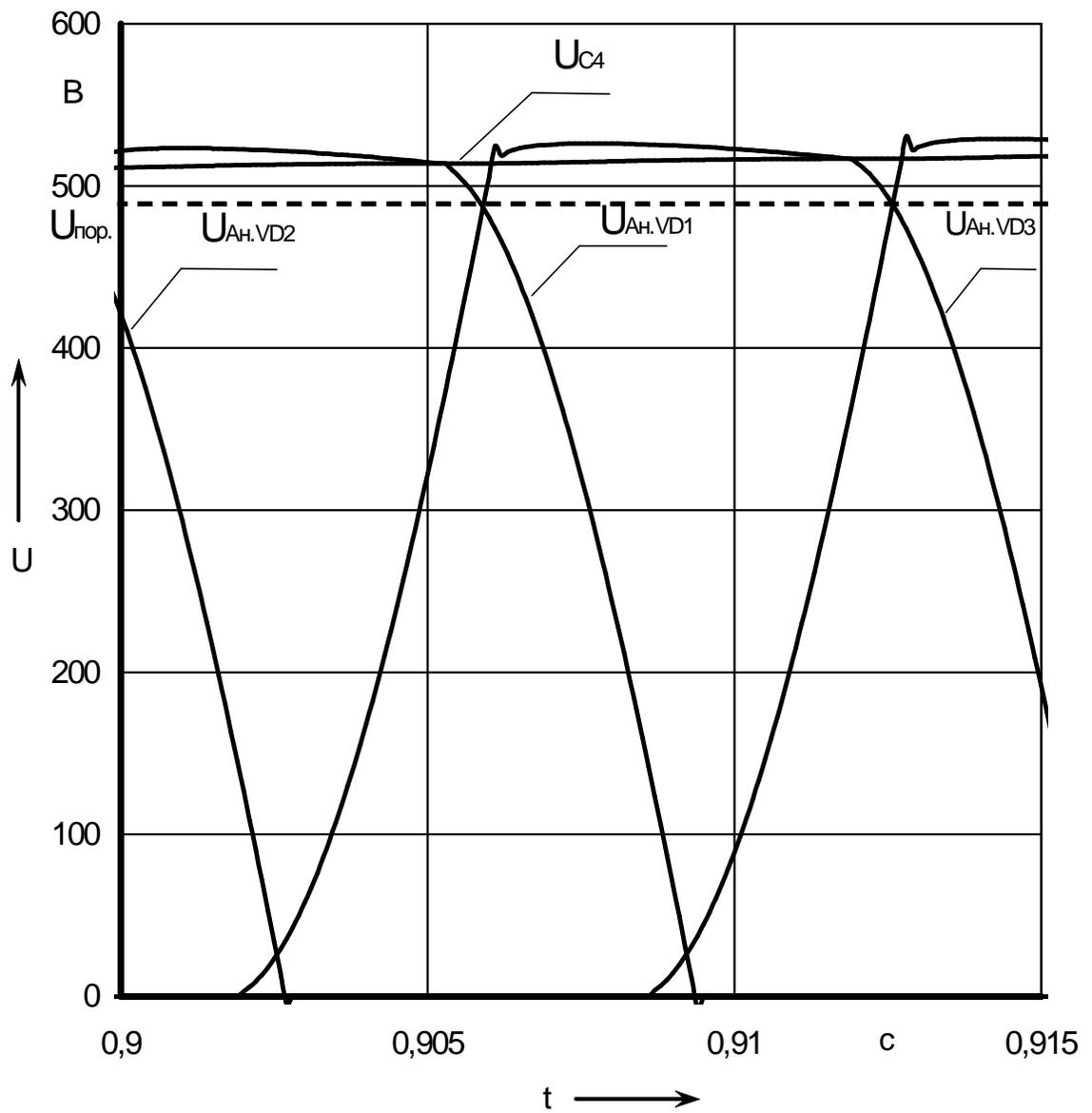


Рис. 2.34. Расчетная диаграмма напряжений в режиме прерывистого тока.

2.3.3. Выбор элементов и варианты схем.

Характеристика токов и напряжений схемы заряда.

На испытательном стенде научно-исследовательской лаборатории №6 Тольяттинского государственного университета, где проводилось экспериментальное исследование (рис. 2.35) схемы заряда наблюдались некоторые особые внешние условия. Во-первых, повышенное напряжение в сети (фазное напряжение равно 260 – 265 В) и, во-вторых, небольшой перекося напряжения между фазами. Поэтому на полупроводниковых приборах и токоограничивающих конденсаторах напряжение на осциллограммах несколько выше, чем предполагалось.

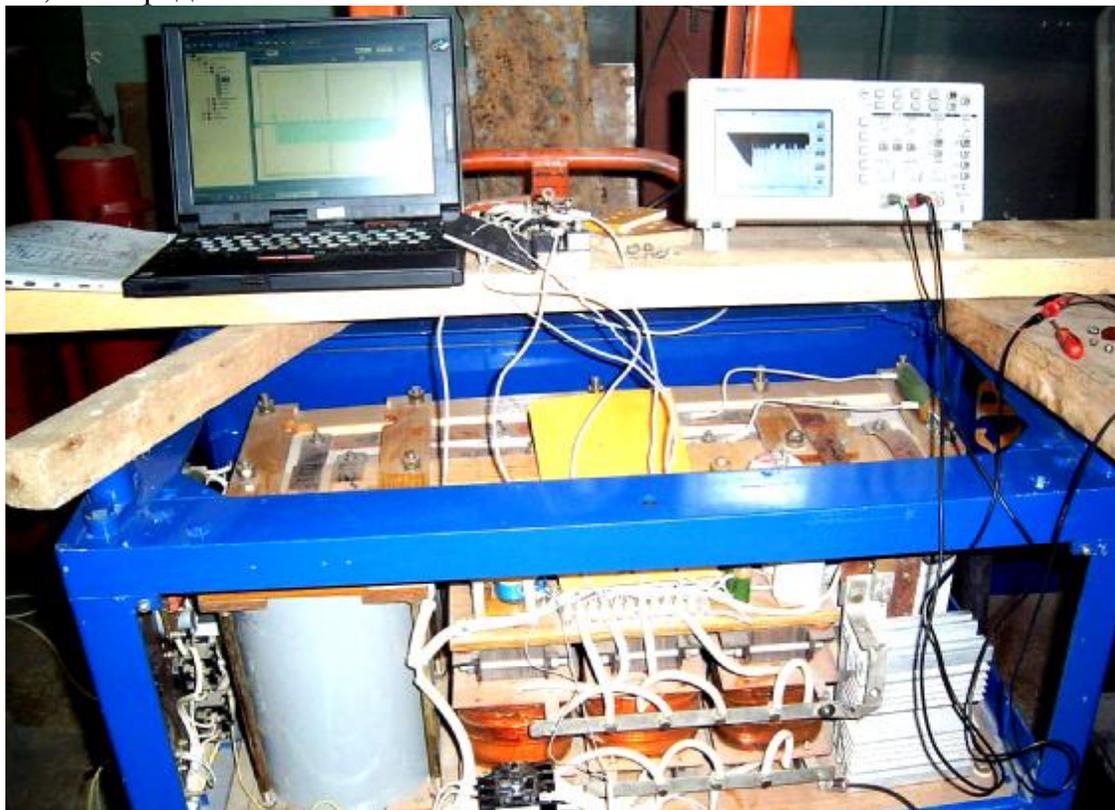


Рис. 2.35. Фотография схемы питания во время экспериментальных исследований.

Наибольшее напряжение ($U_{\text{обрVD1-3}}=1300\text{В}$) на элементах зарядного устройства (рис. 2.19) не превышает удвоенного амплитудного значения фазного напряжения вторичной обмотки повышающего трансформатора.

Максимальное значение тока заряда (рис. 2.29) ёмкостного накопителя не превышает 6 А и по мере заряда накопителя уменьшается до 4 А. В момент начала заряда накопителя и его импульсного дозаряда наблюдаются одиночные импульсы тока с амплитудой до 12 А и длительностью 10 миллисекунд.

Максимальный ток диода (рис. 2.24) и тиристора оптрона (рис. 2.26) модулей выпрямителя и токоограничивающих конденсаторов, ёмкость которых 20 мкФ, равен 3 А, причём в моменты выключения оптронов на осциллограммах нет обратного тока через них.

Напряжение на ёмкостном накопителе поддерживается схемой стабилизации на заданном уровне с точностью не более одного процента.

Из полупроводниковых приборов зарядного устройства (рис. 2.19) в наиболее тяжёлом (по величине приложенного к ним напряжения) режиме работают диоды выпрямителя.

Предварительные рекомендации.

При величине токоограничивающих конденсаторов равной 20 мкФ время заряда ёмкостного накопителя составляет 2,5 секунды. При применении схемы (рис. 2.19) с обычным (для импульсной сейсморазведки) промежутком времени между воздействиями (6 секунд) величину ёмкости каждого из токоограничивающих конденсаторов можно уменьшить до 10 мкФ. Это снизит токовые нагрузки на полупроводниковые приборы, токоограничивающие конденсаторы и трансформаторы, а также облегчит режим работы автономной электростанции.

Полупроводниковые приборы необходимо применять не ниже 16 класса по напряжению, а по току – можно ставить сорокаамперные приборы вместо восьмидесятиамперных приборов.

Модули МДТО в полевых условиях могут выходить из строя вследствие значительных механических нагрузок, вызванных тряской при транспортировке сейсмоисточника, и отказами цепи управления оптрона, обусловленными большими перепадами температуры окружающей среды. Поэтому далее будет рассмотрен вопрос о применении в схеме заряда одного ключевого элемента и более надежного диодного моста.

При неправильном подключении одной из фаз наблюдается двукратное увеличение амплитуды зарядного тока и прерывистый его характер на протяжении всего времени заряда. Так как в цепи заряда накопительного конденсатора установлено токоограничивающее сопротивление, то двукратное увеличение тока приводит к четырёхкратному увеличению потерь на этом сопротивлении. В рассматриваемом случае увеличивается время заряда накопительного конденсатора и понижается КПД всей системы питания в целом.

Определение параметров элементов схемы заряда.

Одной из основных целей исследовательских работ являлось определение оптимальных значений и диапазонов значений параметров элементов исследуемой схемы. Поэтому в данном подпункте определены основные параметры элементов схемы питания импульсного сейсмоисточника, даны рекомендации по дальнейшему конструированию схем питания импульсных сейсмоисточников.

1) Определение параметров полупроводниковых приборов

При выборе полупроводниковых приборов необходимо учитывать импульсный характер токов протекающих через них. Мгновенные значения токов превышают действующие токи, протекающие через приборы, в пять раз

(рис. 2.24, 2.28). Основные оптимальные параметры полупроводниковых приборов сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Параметры полупроводниковых приборов

Перечень параметров	Значение параметра
Действующий ток, А	5
Ударный ток, А	25
Обратное напряжение, В	1400
Скорость нарастания тока di/dt , мА/мкс	10
Скорость нарастания положительного напряжения на тиристорах du/dt , В/мкс	3

Параметры полупроводниковых приборов (VD1-VD3, VS1-VS3; рис. 2.19) были определены при анализе осциллограмм (рис. 2.23-2.26) и расчётных диаграмм (рис. 2.27).

2) Определение параметров токоформирующих конденсаторов

При выборе величины токоформирующего конденсатора (C1-C3 рис. 2.19), основным критерием выбора является, время заряда накопительного конденсатора (C4 рис. 2.19). Для определения величины ёмкости был построен график (рис. 2.36), на котором изображена зависимость времени заряда накопительного конденсатора до напряжения 950 В, от величины ёмкости токоформирующего конденсатора. Благодаря графику (рис. 2.36) можно определить оптимальное значение ёмкости токоформирующего конденсатора. Для исследуемой схемы сейсмоисточника оптимальное значение ёмкости

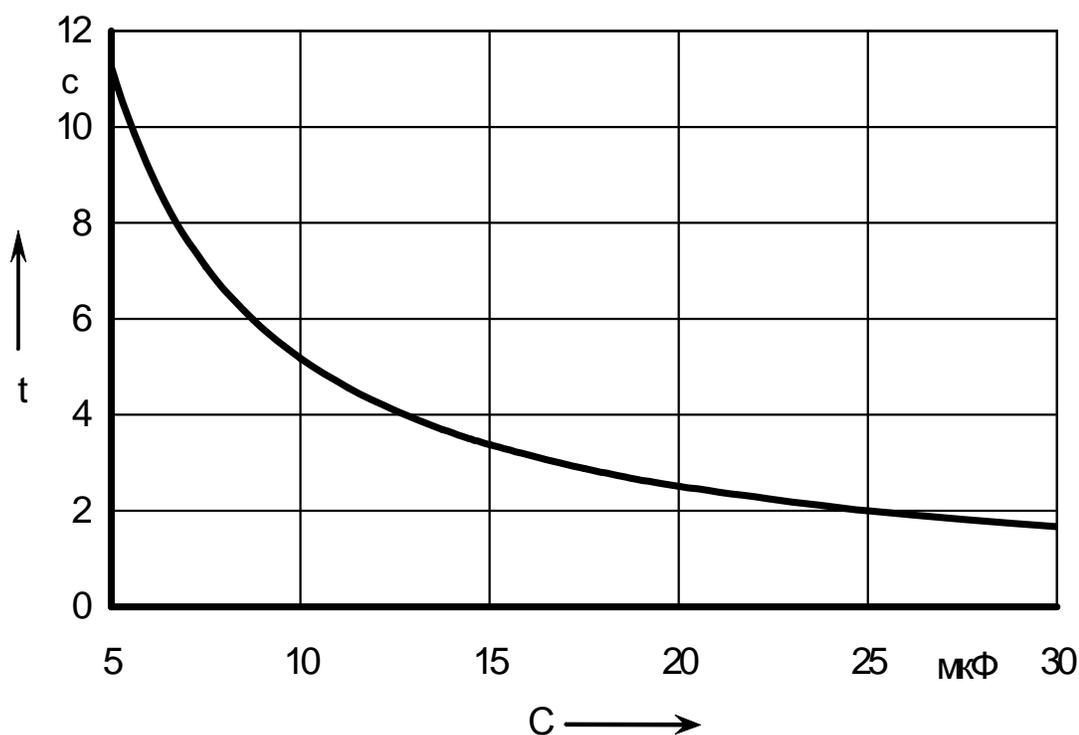


Рис. 2.36. График зависимости времени заряда накопительного конденсатора (суммарной ёмкостью 5 мФ) до напряжения 950 В от величины ёмкости токоформирующего конденсатора.

токоформирующего конденсатора равно 17 мкФ.

3) Определение параметров токоограничивающих резисторов

Значения токоограничивающих сопротивлений (R5-R7, рис. 2.19) выбираются из соображений ограничения ударных токов через полупроводниковые приборы. Максимальные значения ударных токов возникают в момент включения тиристоров VS1-VS3, когда напряжение на токоформирующих конденсаторах C1-C4 равно нулю, а напряжение на одной вторичной обмотке трансформаторов TV1-TV3 равно отрицательному амплитудному напряжению. С помощью расчётной программы был, рассчитан ударный ток и при значении токоограничивающих сопротивлений 10 Ом.

Максимальная амплитуда ударного тока, при расчёте составила 24 А (оптимальный ударный ток 25 А, табл. 2.3). Следовательно, оптимальное значение токоограничивающего сопротивления равно 10 Ом.

Предложения по вариантам схем.

1) Предложение, направленное на повышение надёжности схемы питания импульсного сейсмоисточника.

Модули МДТО (рис. 2.19) в полевых условиях могут выходить из строя вследствие значительных механических нагрузок, вызванных тряской при транспортировке, и отказами цепи управления оптрона, обусловленными большими перепадами температуры окружающей среды. Снизить вероятность таких событий и повысить надёжность предлагается применением в схеме заряда одного ключевого элемента и более надёжного – диодного моста. Ключевой элемент – тиристор оптрона предлагается включить последовательно в ветвь с резистором R8 (рис. 2.37).

Принцип управления системой питания останется без изменения. Если в

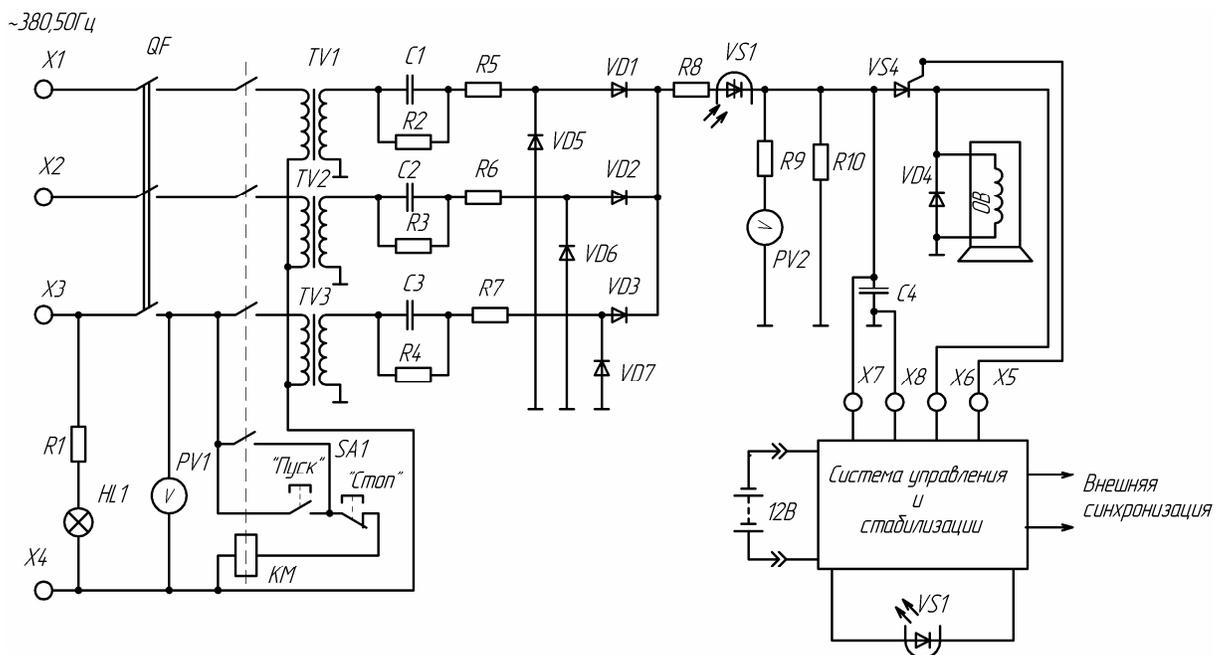


Рис. 2.37. Упрощенная схема системы питания электромагнитного привода водного сейсмоисточника с одним ключевым элементом в схеме заряда.

ранее рассмотренной схеме (рис. 2.19), стабилизация напряжения на накопительном конденсаторе $C4$ осуществлялась при помощи тиристоров $VS1$ - $VS3$, то теперь (рис. 2.37) их заменяет один тиристор $VS1$, включенный в цепь заряда накопительного конденсатора $C4$. Расчёты, полученные с помощью программы, показали, что модернизированная схема не ухудшает основные параметры базовой схемы (рис. 2.19). Основная цель предлагаемой модернизации это повышение надёжности и снижение стоимости электрической схемы питания импульсного сейсмоисточника.

2) Предложение, направленное на повышение КПД и снижение потребляемой мощности схемы питания импульсного сейсмоисточника.

Одним из способов повышения КПД схемы питания импульсного сейсмоисточника является уменьшение количества активных сопротивлений. В исследуемой схеме основные потери мощности происходят на токоограничивающих сопротивлениях $R5$ - $R8$ (рис. 2.19). Свести потери мощности к минимуму позволяет схема, предложенная на рис. 2.38. В предложенной схеме (рис. 2.38) токоограничивающие сопротивления заменены дросселями $L1$ - $L4$. Наличие дросселей $L1$ - $L4$ препятствует возникновению бросков тока через полупроводниковые приборы $VD1$ - $VD3$, $VS1$ - $VS3$. Поскольку дроссели обладают преимущественно реактивным сопротивлением, то потери мощности в них минимальны, следовательно, КПД схемы в целом возрастает.

Значения емкостей конденсаторов $C1$ - $C3$ и индуктивностей дросселей $L1$ - $L4$ (рис. 2.38), подобраны таким образом, чтобы действующее значение зарядного тока накопительного конденсатора оставалось постоянным на протяжении всего времени заряда. При помощи программного расчёта была проведена оптимизация параметров элементов $C1$ - $C3$ и $L1$ - $L4$. Критерием

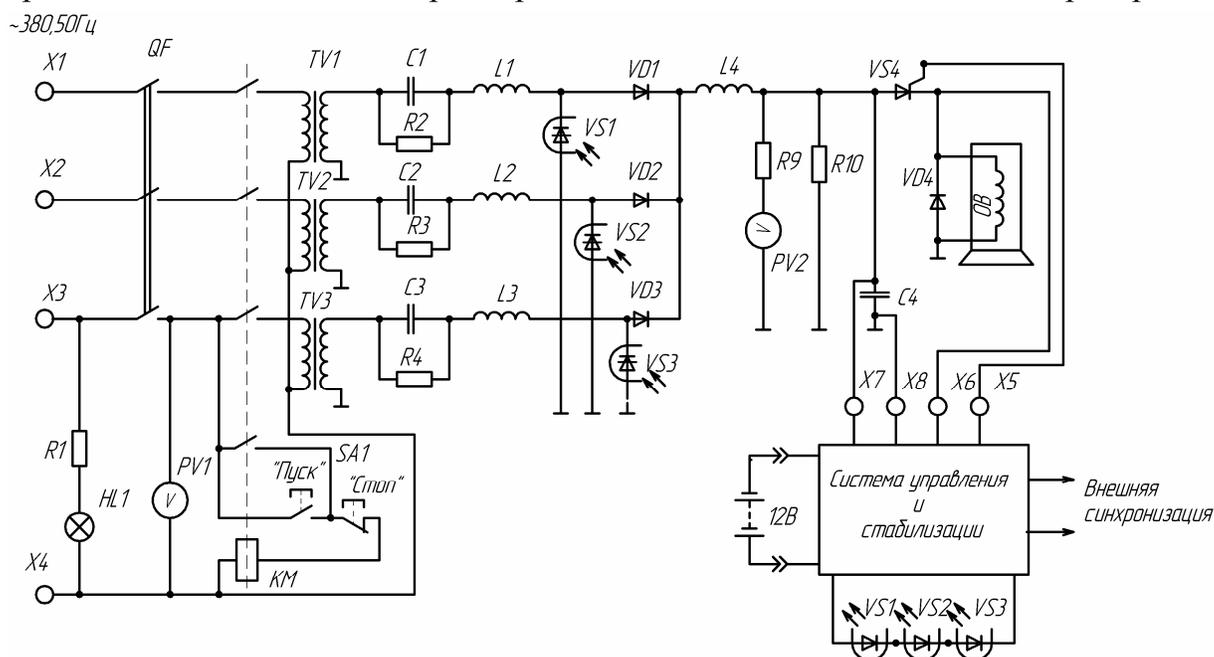


Рис. 2.38. Упрощенная схема системы питания электромагнитного привода водного сейсмоисточника с индуктивными токоограничивающими элементами.

оптимизации было выбрано постоянство действующего значения тока на протяжении всего времени заряда накопительного конденсатора С4. Результатами расчёта являются диаграмма зарядного тока (рис. 2.39) и диаграмма напряжения на накопительном конденсаторе в процессе заряда (рис. 2.40). Расчётные значения элементов сведены в табл. 2.4.

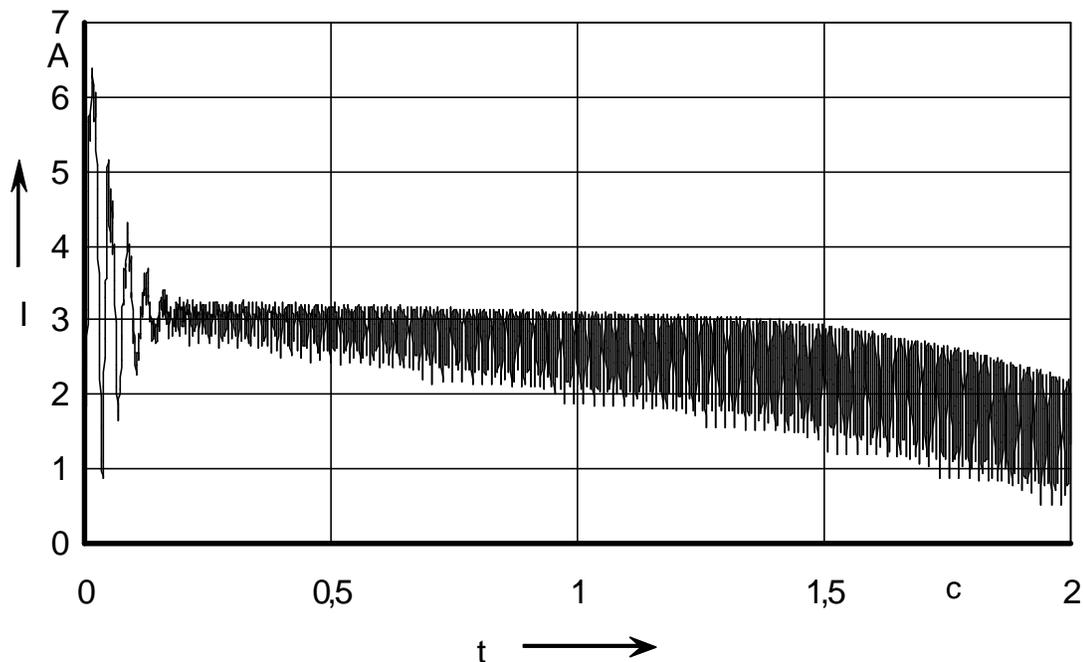


Рис. 2.39. Расчётная диаграмма тока заряда емкостного накопителя (С4).

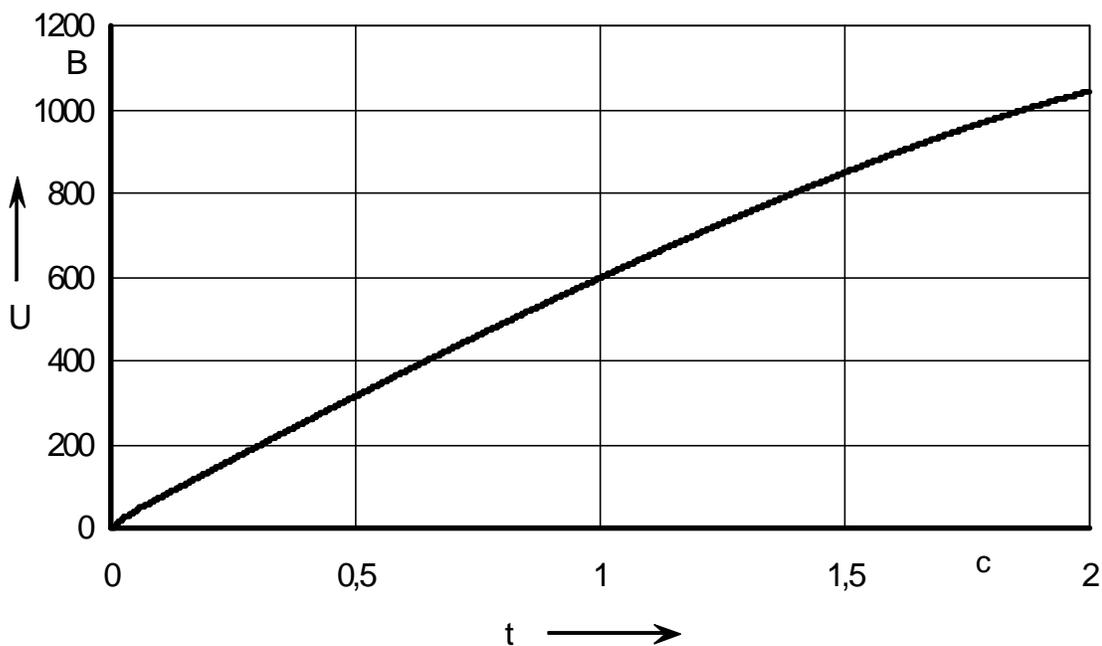


Рис. 2.40. Расчётная диаграмма напряжения на емкостном накопителе (С4).

Таблица 2.4.

Расчётные значения элементов

Обозначение элемента на схеме (рис. 2.41)	Значение параметра элемента
C1-C3, мкФ	10
L1-L3, Гн	0,4
L4, мГн	70

Если сравнить экспериментально полученную осциллограмму напряжения на накопительном конденсаторе (рис. 2.28) и расчётную диаграмму напряжения на накопительном конденсаторе (рис. 2.40) не трудно заметить, что на диаграмме напряжение нарастает быстрее, чем на осциллограмме. Это объясняется непрерывным характером тока заряда (рис. 2.39), который поддерживается в течении всего времени заряда. Действующее значение зарядного тока предлагаемой схеме (рис. 2.38) значительно ниже, чем в исходной схеме (рис. 2.19) следовательно, потребляемая мощность от источника питания уменьшается. Кроме того, значение ёмкостей конденсаторов C1-C3 (табл. 2.4) в предлагаемой схеме уменьшено вдвое по сравнению с исходной схемой.

Важным условием реализации предложенного решения является необходимость обеспечения выхода на режим прерывистых токов в конце заряда. Это необходимо для закрытия управляющих силовых ключей.

2.4. Экологический аспект водной сейсморазведки

Принимая во внимание увеличение объёмов водной сейсморазведки и её неизбежное воздействие на окружающую среду на больших площадях, можно заключить, что существенное и всё возрастающее значение при разработке методик и средств сейсморазведочных работ на акваториях имеет учёт экологического фактора.

Как известно, принцип сейсмической разведки заключается в возбуждении колебаний в исследуемой среде с последующим приёмом и обработкой откликов (отражённых и преломлённых волн) среды на созданные колебания. Таким образом, если не рассматривать вспомогательные транспортные работы и работы по жизнеобеспечению сейсмопартий, то основными взаимодействующими со средой объектами являются средства возбуждения колебаний – сейсмоисточники.

В наземной сейсморазведке вопросы экологичности сейсмоисточников во многом сняты в связи с широким распространением гидравлических вибраторов и импульсных невзрывных сейсмоисточников с электромагнитным приводом [67]. Указанные средства возбуждения сейсмических колебаний, благодаря пренебрежимо малому негативному воздействию на окружающую среду, успешно проходят экспертизы на получение экологических сертификатов [68]. И, в отличие от взрывной сейсморазведки, наземные невзрывные импульсные и вибрационные сейсмоисточники не порождают факторы, ограничивающие применение наземной сейсморазведки с точки зрения экологии.

Из приведённого в п.п. 1.2 описания принципа действия пневмопушек можно выделить основные опасные и вредные факторы, присущие водной сейсморазведке с применением пневмопушек. К таким факторам относятся:

- ударная волна от расширяющейся газовой полости;
- акустическое излучение сейсмоисточника и системы его питания;
- избыточный выброс продуктов горения топлива первичных генераторов энергии (дизель-генераторов), что является следствием низкого КПД преобразования энергии генераторов в энергию акустического излучения.

Можно выделить три основных направления проявления указанных факторов:

1) повышенная опасность работ, связанная с высвобождением высокой импульсной энергии в виде быстрого выброса большого объёма воздуха. При этом эксплуатирующий персонал подвергается повышенной опасности не только напрямую, но и косвенно, в связи с возможностью повреждения плавсредств и другой техники, а также за счёт запутывания тралов в буксируемой оснастке судов сейсморазведки.

2) неэкономичное использование первичных источников энергии (дизель-генераторов, компрессоров). Это связано с тем, что собственно в акустическое излучение, которое после отражений и преломлений будет фиксироваться регистрирующей аппаратурой, идут единицы, а то и доли процента от энергии первичных источников. Остальное тратится на потери при компрессии воздуха и гидродинамические процессы, т.е. движение жидкости во время "выстрела".

3) негативное влияние на биосферу. В научных исследованиях [например, 69, 70], обобщающих опыт проведения водных сейсморазведочных работ, отмечаются различные примеры негативного воздействия на различных представителей ихтиофауны. Например: летальные исходы и травмирование рыб и других гидробионтов; изменение поведенческих реакций; перекрытие миграционных путей; препятствование общению, являющемуся особо важным для некоторых видов обитателей акваторий (например, китов).

Выделяют несколько зон воздействия пневмосигналов на морских животных [69, с. 49]:

- 1) зона летального исхода;
- 2) зона патологических воздействий;
- 3) зона избегания;
- 4) зона поведенческих реакций;
- 5) зона маскировки – зона, в радиусе которой от источника шума (пневмопушки) средства коммуникационных сигналов животных полностью или частично замаскированы;
- 6) зона слышимости.

Как следует из названий зон, в каждой из них происходят те или иные негативные воздействия на гидробионтов. Если при этом учесть, что сейсморазведочные работы могут проходить продолжительное время и с применением группирования пневмоисточников (т.е. с перекрытием указанными зонами значительных объёмов в водной среде), то становится очевидным существование негативного влияния в приведённых примерах.

Большинство вышеприведённых недостатков, выявленных в аспекте экологичности и безопасности, а также не упоминаемые здесь технические недостатки связаны с несколькими особенностями пневматических источников сейсмических сигналов:

1) обусловленное принципом действия создание в водной среде больших газовых полостей;

2) необходимость погружения источника на значительную глубину (существенно превышающую его линейные размеры);

3) низкое использование энергии первичного источника. В условиях автономной работы сейсмопартий на профиле это является весьма существенным недостатком.

Исключение (или существенное снижение) указанных негативных явлений обеспечивается в предлагаемом [35] принципиально ином типе сейсмоисточников для акваторий, отличающимся минимальным воздействием на биосферу и экономичностью.

Суть принципиальных отличий нового типа водных сейсмоисточников, обусловившая их экологичность и энергоэкономичность, состоит в следующем. Во-первых, излучение осуществляется практически без создания макронеоднородности (воздушной полости, в случае пневмопушки) в водной среде. Акустическая волна создаётся излучателем (резиновой мембраной или металлическим диском) диаметром около 1 м, за счёт его колебаний, с амплитудой до десятка миллиметров. Таким образом, отсутствие расширяющейся газовой полости практически исключает эффект гидроудара, а наличие направленности излучения существенно снижает зону негативного звукового воздействия.

Во-вторых, в качестве силового привода для излучателя применён импульсный линейный электромагнитный двигатель на короткоходовом электромагните. Его преимуществами являются высокий КПД преобразования энергии первичного источника питания в механическую энергию движения излучателя и, как следствие, собственно энергию сейсмической волны. Это обуславливает возможность использования источников энергии меньшей мощности, например, автомобильного аккумулятора, отсутствие вредных выхлопов и шума от которого очевидны.

Сейсмоисточник, упрощённая схема которого приведена на рис. 2.2, был разработан [36], изготовлен и испытан в Научно-исследовательской лаборатории №6 Тольяттинского государственного университета. В ходе полевых испытаний, проведённых в 2004 г. на водохранилище в Саратовской области, были получены следующие результаты наблюдений за влиянием работы сейсмоисточника на состояние и поведение рыб: летальных исходов и травмирования рыб не наблюдалось, более того, не были отмечены изменения поведения и избегания района проведения испытаний и ближайшей к работающей установке зоне.

Таким образом, можно заключить, что успешному внедрению водных импульсных поверхностных источников сейсмических колебаний предложенного типа могут способствовать изначально заложенные в их

принцип действия высокие энергоэкономичные и экологичные решения, частично проверенные в ходе полевых испытаний.

Материалы данного подпункта были опубликованы на международной конференции по экологии и безопасности жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов [71].

Выводы

1. Предложено конструктивное решение водного поверхностного невзрывного сейсмоисточника с электромагнитным приводом, позволяющее работать при глубине водного слоя от 0,5 м и более, отличающегося пониженным энергопотреблением, меньшими эксплуатационными затратами и возможностью обеспечения нескольких режимов воздействия на водную акустическую нагрузку.

2. Обоснован выбор короткоходового электромагнита в качестве силового привода водного сейсмоисточника. Проанализированы особенности энергетической диаграммы электромагнитного привода при режиме возбуждения, приближающемся к постоянству потокосцепления в течение времени создания электромагнитом усилия.

3. Рассмотрены вопросы, связанные с одной из особенностей импульсного электромагнитного привода сейсмоисточников – фронтом силы короткоходового электромагнита.

Определено, что доля зазора, выбирающаяся за время фронта не превышает 5% от величины зазора, что позволило выполнить упрощение функции фронта для математического моделирования.

4. Анализ перераспределения магнитных потоков в электромагните с ростом зазора и начальной энергии накопителя показал особенности и допустимость использования увеличенного зазора.

5. Предложена методика экспериментального исследования электромагнита, позволяющая определить энергетический баланс в электромеханической системе и оценить влияние на него различных факторов.

6. Приведены технические требования и условия для системы электрического питания водного сейсмоисточника. Обоснован выбор схемы заряда емкостного накопителя и предложены принципы управления зарядом, обеспечивающие потребности электрического питания силового привода.

7. На основе экспериментальных данных и результатов математического моделирования рассмотрены особенности разработанной схемы заряда емкостного накопителя энергии. Был предложен переход от активного токоограничения к реактивному, позволяющий уменьшить потери мощности при заряде и время заряда емкостного накопителя.

8. Показано, что отсутствие эффекта расширяющейся полости, направленность излучения и экономичность используемого типа силового привода у разработанного водного сейсмоисточника, обуславливают его экологичность и энергоэкономичность.

ГЛАВА 3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМОИСТОЧНИКА

В главе приведено обоснование необходимости использования в водном сейсмоисточнике различных режимов работы его электромеханической системы. Дано качественное описание режимов с использованием механических схем. Приведены данные оценочных расчётов, поясняющие особенности режимов. Описана математическая модель, созданная с применением метода электромеханических аналогий, и сделаны выводы по результатам расчётов с её использованием.

3.1. Режимы работы

Особенностью разрабатываемого водного сейсмоисточника является импульсный характер его воздействия на водную среду и невысокое значение запасаемой энергии (единицы килоджоулей против сотен килоджоулей у пневмопушек [9, с. 47]). Поэтому для получения сейсмического эффекта становится особенно важным вид формируемого воздействия (амплитуда, длительность, крутизна фронта).

В научно-технической литературе [например, 72 – 76] наиболее изученным является гармоническое излучение сигнала. Ввиду недостаточности данных по импульсному воздействию на водную среду и, следовательно, неизвестности оптимальных режимов работы, в водном сейсмоисточнике "Аква" была предусмотрена возможность исследования нескольких режимов.

Для использования в описании режимов, и далее, при создании математической модели, на рис. 3.1 приведена конструктивная схема сейсмоисточника "Аква" с обозначением элементов механической системы.

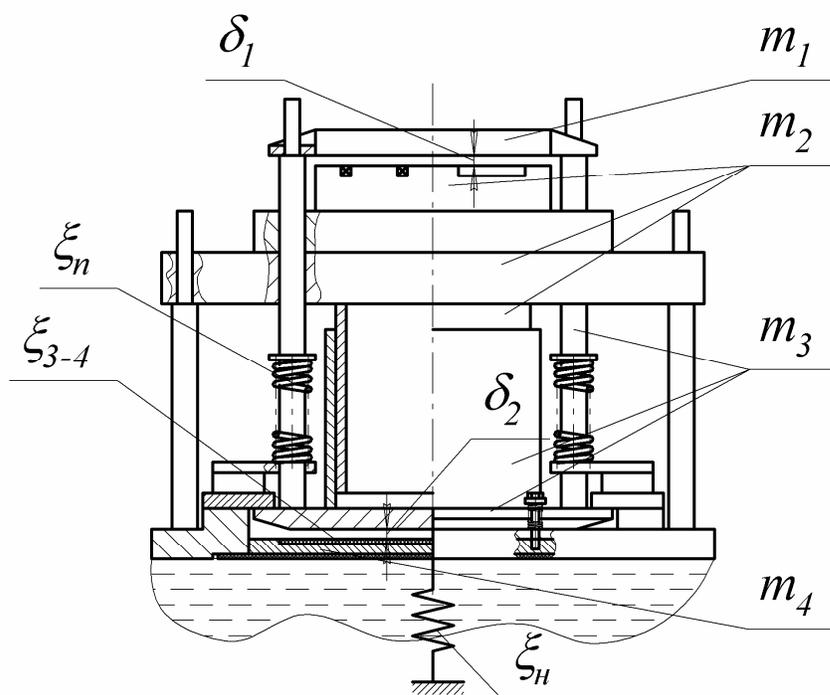


Рис. 3.1. Конструктивная схема водного сейсмоисточника с обозначениями элементов механической системы.

На рис. 3.1 обозначено:

m_1 – масса якоря, $m_1 = 200$ кг;

m_2 – масса индуктора с пригрузом, $m_2 = 1560$ кг;

m_3 – масса ударника со стойками, $m_3 = 224$ кг;

m_4 – масса излучающей плиты, $m_4 = 78$ кг;

ξ_{3-4} – упругость резиновой прокладки, м/Н;

ξ_n – упругость нагрузки, м/Н;

d_1 – зазор между якорем и индуктором (в электромагните); в конструкции сейсмоисточника предусмотрена регулировка величины этого зазора:

$$d_1 = (4..10) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

d_2 – зазор между ударником и упругостью ξ_{3-4} ("механический" зазор),

$$d_2 = (0.. d_1 - D) \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где D – запас хода, обеспечивающий воздействие на плиту до выбора зазора d_1 в электромагните;

ξ_n – упругость пружины вывешивающей ударник $\xi_n = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м/Н.

3.1.1. Режим давления на плиту-антенну.

На рис. 3.2 приведена упрощённая конструктивная схема (аналогичная рис. 2.1, п.п. 2.1.1) и механическая цепь импульсного сейсмоисточника электромагнитного типа работающего в режиме давления [31, 32, 38, 55, 56 и др.]. Якорь 1 (m_1) электромагнита опёрт на стойки излучающей плиты 3 ($m_3 + m_4$), являющейся рабочим органом установки. На плите установлен пригруз 2 (m_2) с закреплённым на нём индуктором, который отделён от якоря зазором d_1 . При подаче в обмотку 4 импульса тока между якорем и индуктором создаётся

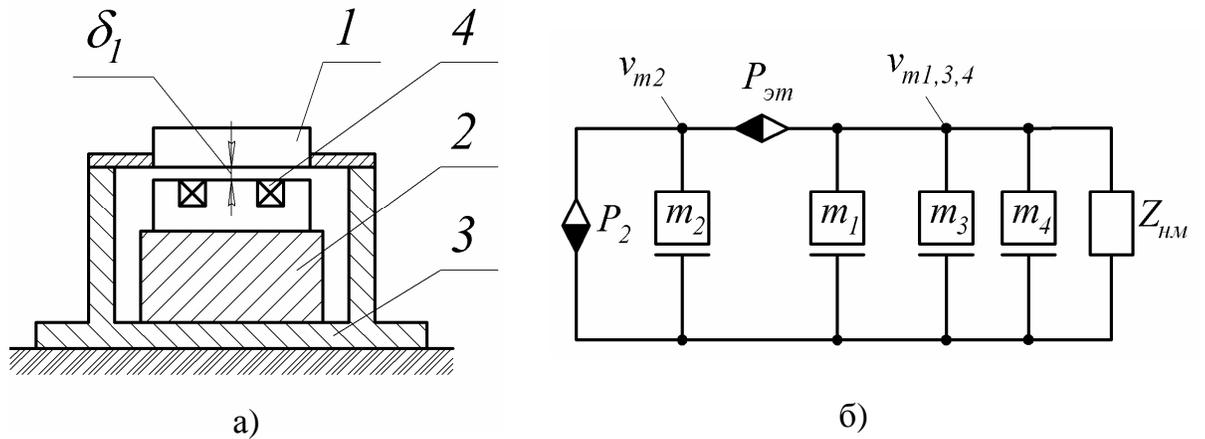


Рис. 3.2. Конструктивная схема (а) и механическая цепь (б) сейсмоисточника в режиме давления.

сила $P_{эм}$. Якорь и плита при этом движутся под действием силы $P_{эм}$ вниз, в направлении сжатия среды, а индуктор с пригрузом 2 – вверх. После выбора зазора δ_1 за время t_{δ_1} якорь и индуктор соударяются. Поскольку масса m_2 индуктора с пригрузом существенно больше массы m_1 якоря, то после их ударного взаимодействия, имеющего обычно неупругий характер, они начинают совместное движение вверх в поле силы тяжести и через некоторое время, обычно составляющее сотни миллисекунд, возвращаются в исходное положение. Движение плиты 3 вниз сопровождается формированием воздействия на среду.

Рассмотренный режим работы, при котором движению плиты с якорем в направлении деформации среды противодействует сила реакции среды с самого начала действия силы $P_{эм}$, можно назвать режимом давления.

Как упомянуто выше, в режиме давления противодействие среды движению якоря начинается с начала действия силы электромагнита, т.е. в начале движения излучателя. При этом, предполагается возможным (это будет показано ниже), что формирование акустической волны завершится до момента полного выбора зазора, на малых перемещениях якоря (например не более 10-20 % от зазора δ_1). В этом случае оставшая часть зазора за время действия силы $P_{эм}$ выберется без совершения полезной функции. Соответственно энергия движения якоря и излучающей плиты, включая энергию воздействия на среду,

$$A_1 = (0,1 \div 0,2) \cdot A, \quad (3.1)$$

где A – начальная энергия емкостного накопителя.

Естественно, что при этом оказывается весьма небольшим и коэффициент передачи энергии A в нагрузку.

$$\eta = A_1/A = (0,1 \div 0,2), \text{ т.е. } 10 \div 20 \%. \quad (3.2)$$

При возможном наличии описанного эффекта, для повышения доли энергии, расходуемой рабочим органом и, в конечном итоге, потребляемой нагрузкой, предлагается улучшить согласованность работы привода на нагрузку с помощью изменения режима его работы. Получение новых, более

эффективных режимов работы связывается с совершенствованием цепочки связей "электромагнитный двигатель – рабочий орган – нагрузка".

Первым и наиболее простым решением по повышению характеристик установки (предложенным, например, в патенте РФ № 2242027 [34]) является применение в рассмотренной двухмассовой системе (рис. 3.2) дополнительной упругости между якорем и излучателем. Из теоретических и экспериментальных исследований следует, что применение упругого взаимодействия якоря электромагнита с излучателем может позволить на 15-20% и, возможно, более, увеличить скорость нагружения среды под плитой и, следовательно, механическую энергию рабочего органа.

Вторым решением задачи увеличения излучаемой энергии и сейсмических возможностей могут являться специально организованные ударные режимы нагружения излучающего элемента сейсмоисточника.

3.1.2. Режим удара.

Этот режим характеризуется предварительным ускорением ударной массы до некоторой скорости с последующим ударом по плите-антенне. Ударный режим можно осуществить следующим образом. На части x зазора δ_1 якорь с ударником ускоряются силой $P_{эм}$ без влияния нагрузки. При этом якорь получит возможность выбрать большую часть зазора δ_1 в сравнении с режимом давления и затем обеспечить передачу большей энергии в нагрузку. Механическая цепь сейсмоисточника для режима **жесткого удара** приведена на рис. 3.3. Под действием развиваемой электромагнитом силы $P_{эм}$ якорь-ударник массой $(m_1 + m_3)$ и пригруз m_2 весом P_2 ускоряются при их перемещениях x_{13} и x_2 до скоростей v_1 и v_2 при частичном выборе зазора δ_1 электромагнита $\delta_1 < x_{13} + x_2$ (рис. 3.1). Последнее неравенство соответствует условию выбора зазора позже начала ударного воздействия на среду.

Замыкание ключа $K_{\delta 2}$ в механической схеме (рис. 3.3) обеспечивает начало ударного процесса между массой m_{13} ударника-якоря и массой m_4

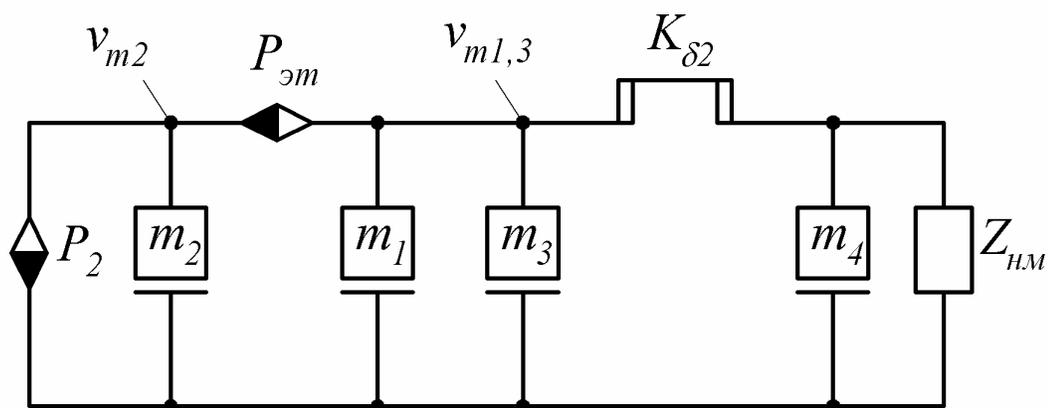


Рис. 3.3. Механическая цепь при жестком ударе ударника по излучающей плите.

плиты-антенны. Из рис. 3.3 следует, что до момента замыкания ключа движение масс m_2 и m_{13} под действием силы $P_{эм}$ происходит независимо.

Сделаем оценочные расчёты, поясняющие особенности режима жёсткого удара. Силу $P_{эм}$ целесообразно принять постоянной в течение времени выбора зазора δ_1 , поскольку реальная длительность фронта импульса силы существенно меньше времени энергопреобразования в зазоре электромагнита (п.п. 2.2.2). Вес якоря P_1 можно не учитывать, поскольку $P_1 \ll P_{эм}$, а якорь и ударник опираются на пружины, сжатие которых в значительной мере компенсирует их общий вес. При режиме жесткого удара якорь и ударник движутся вместе до конечного этапа формирования воздействия на среду, поэтому они объединены в одну массу $m_{13} = m_1 + m_3$ на период их разгона и удара по плите m_4 .

При принятых условиях уравнение движения пригруза

$$P_{эм} - P_2 = m_2 \frac{dv_2}{dt} = m_2 a_2, \quad (3.3)$$

уравнение движения якоря-ударника

$$P_{эм} = m_{13} \frac{dv_{13}}{dt} = m_{13} \cdot a_{13}. \quad (3.4)$$

Сила $P_{эм}$ действует между якорем с ударником и пригрузом, и, следовательно, перемещения x_1 и x_2 этих масс и их скорости v_1 , v_2 соответствуют равноускоренному движению:

$$x_{13} = \frac{P_{эм}}{m_1 + m_3} \cdot \frac{t^2}{2}; \quad x_2 = \frac{P_{эм}}{m_2} \cdot \frac{t^2}{2}; \quad (3.5)$$

$$v_{13} = \frac{P_{эм}}{m_1 + m_3} \cdot t; \quad v_2 = \frac{P_{эм}}{m_2} \cdot t,$$

а получаемые кинетические энергии

$$A_{13} = P_{эм} \cdot x_{13}; \quad A_2 = P_{эм} \cdot x_2. \quad (3.6)$$

Отсюда очевидно, что

$$\frac{x_{13}}{x_2} = \frac{A_{13}}{A_2} = \frac{v_{13}}{v_2} = \frac{m_2}{m_{13} + m_3}. \quad (3.7)$$

В соответствии с рис. 3.1 перемещения x_{13} и x_2 направлены встречно и их результатом является уменьшение x зазора δ_1 .

$$d_1 \geq x = x_{13} + x_2 = \frac{P_{эм} \cdot t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{m_1 + m_3} + \frac{1}{m_2} \right) = \frac{P_{эм} \cdot t^2}{2} \cdot \frac{1}{m_э}, \quad (3.8)$$

где $m_э$ – эквивалентное значение массы.

Равенство $x = x_{13} + x_2$ можно преобразовать с учётом (3.7)

$$x = x_{13} + \frac{m_1 + m_3}{m_2} \cdot x_{13} = x_{13} \cdot \left(1 + \frac{m_1 + m_3}{m_2} \right) = x_{13} \cdot \frac{m_2 + m_1 + m_3}{m_2}. \quad (3.9)$$

Отсюда

$$x_{13} = x \cdot \frac{m_2}{m_2 + m_1 + m_3}. \quad (3.10)$$

Из очевидного соотношения

$$P = \frac{A_{13}}{x_{13}} = \frac{A}{d_1} \quad (3.11)$$

получаем:

$$A_{13} = A \cdot \frac{x_{13}}{d_1} = A \cdot \frac{x}{d_1} \cdot \frac{m_2}{m_2 + m_1 + m_3}. \quad (3.12)$$

В момент полного выбора зазора ($x = \delta_1$)

$$A_{13(d1)} = A \cdot \frac{m_2}{m_2 + m_1 + m_3} = A \cdot K_1, \quad (3.13)$$

где $K_1 = \frac{m_2}{m_2 + m_1 + m_3}$ - коэффициент передачи энергии электромагнита в энергию движения якоря с ударником (рис. 3.4).

При $(m_1 + m_3) \rightarrow 0$, $K_1 \rightarrow 1$, т.е. становится максимальным. Однако условие $(m_1 + m_3) \rightarrow 0$ технически нереализуемо из-за того, что якорь электромагнита имеет массу $m_1 \neq 0$, а для удара по излучающему элементу 3 с массой m_4 необходимо дополнительное устройство – ударник с массой $m_3 \neq 0$.

Определим коэффициент K_2 передачи энергии от движущихся со скоростью v_1 якоря с ударником при их взаимодействии с неподвижной

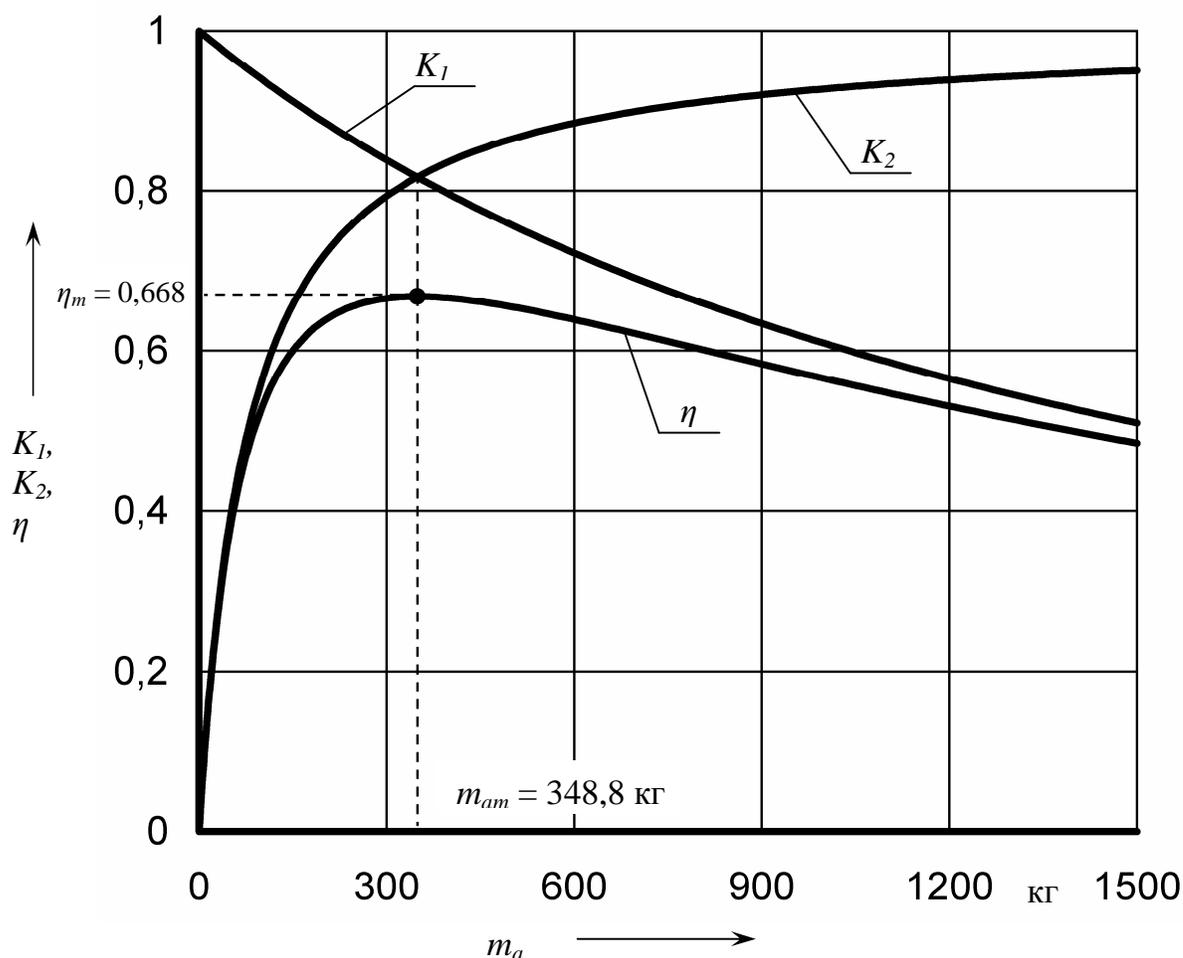


Рис. 3.4. Изменение коэффициентов K_1 , K_2 преобразования энергии и КПД η в зависимости от массы $m_a = m_1 + m_3$ для сейсмоисточника "Аква".

излучающей плитой с массой m_4 .

При неупругом взаимодействии (ударе) сохраняется количество движения

$$(m_1 + m_3) \cdot v_1 = (m_1 + m_3 + m_4) \cdot v_3 \text{ или } v_3 = v_1 \cdot \frac{m_1 + m_3}{m_1 + m_3 + m_4}. \quad (3.14)$$

Энергия движения, т.е. энергия, которая характеризует (определяет) воздействие на акустическую среду (грунт, вода)

$$\begin{aligned} A_3 &= \frac{m_1 + m_3 + m_4}{2} \cdot v_3^2 = \frac{m_1 + m_3 + m_4}{2} \cdot v_1^2 \cdot \frac{(m_1 + m_3)^2}{(m_1 + m_3 + m_4)^2} = \\ &= \frac{(m_1 + m_3) \cdot v_1^2}{2} \cdot \frac{m_1 + m_3}{m_1 + m_3 + m_4} = A_{13} \cdot \frac{m_1 + m_3}{m_1 + m_3 + m_4} \end{aligned} \quad (3.15)$$

С учётом A_{13} по (3.13)

$$A_3 = A \cdot K_1 \cdot K_2; \quad \frac{A_3}{A} = h = K_1 \cdot K_2; \quad (3.16)$$

где η – результирующий коэффициент передачи (КПД);

$$h = \frac{m_2}{m_2 + m_1 + m_3} \cdot \frac{m_1 + m_3}{m_1 + m_3 + m_4}. \quad (3.17)$$

Перед ударом массы m_1 и m_3 движутся вместе. Примем $m_a = m_1 + m_3$. Тогда

$$h = \frac{m_2}{m_2 + m_a} \cdot \frac{m_a}{m_a + m_4} = K_1 \cdot K_2. \quad (3.18)$$

Представляется интересным получившееся для η выражение (3.18): сомножители K_1 и K_2 по структуре одинаковы, хотя характеризуют совершенно разные процессы (K_1 – энергетику при ускорении двух масс электромагнитной силой, а K_2 – неупругий удар двух тел).

Исследование η на оптимум в зависимости от m_a даёт условие оптимальности

$$m_{am} = \sqrt{m_2 \cdot m_4}. \quad (3.19)$$

На рис. 3.4 приведены зависимости K_1 , K_2 и η от массы m_a , из анализа которых следует несколько важных выводов.

При оптимальной (для сейсмоисточника "Аква") массе m_{am}

$$m_{am} = \sqrt{m_2 \cdot m_4} = \sqrt{1560 \cdot 78} = 348,8 \text{ кг}$$

необходимая масса m_3 ударника

$$m_3 = m_{am} - m_1 = 348,8 - 200 = 148,8 \text{ кг}. \quad (3.20)$$

Общий КПД η слабо зависит от массы m_a , которая может выбираться на $(-20 \div +30)\%$ отличающейся от массы m_{am} . Несмотря на то, что масса плиты ($m_4 = 78$ кг) существенно меньше массы m_2 пригруза (в 20 раз) и меньше в 5,4 раза массы m_a , коэффициент передачи K_2 существенно снижает общий КПД η . В связи с этим, вероятнее всего, будет более эффективным сейсмоисточник у которого отсутствует излучающая плита, а ударник наносит воздействие непосредственно по акустической среде (см. п.п. 4.3.1). Также целесообразным может быть выполнение ударника с возможно меньшей массой m_3 , и за счёт этого уменьшенной массой $m_a = m_1 + m_3$.

В результате решения уравнений движения (3.3) и (3.2) также были получены различные механические характеристики процесса, некоторые из

которых приведены в табл. 3.1. Численные данные, приведённые в табл. 3.1 получены для значения электромагнитной силы $P_{эм} = 15 \cdot 10^4$ Н и величины зазора в электромагните $\delta_I = 10$ мм.

Таблица 3.1.

Механические параметры в момент выбора определённой доли зазора δ_I

Описание параметра	Расчётная формула	Выбранная доля зазора	
		1· δ_I	0,75· δ_I
Время удара (от начала действия силы) t_y , с	$t_y = \sqrt{\frac{2 \cdot d_1}{a_{13} + a_2}}$	$6,742 \cdot 10^{-3}$	$5,839 \cdot 10^{-3}$
Скорость якоря с ударником перед ударом V_{13} , м/с	$V_{13} = a_{13} \cdot t_y$	2,386	2,067
Скорость индуктора с пригрузом перед ударом V_2 , м/с	$V_2 = a_2 \cdot t_y$	0,58	0,502
Перемещение якоря с ударником перед ударом $x_{13(t_y)}$, м	$x_{13(t_y)} = \frac{a_{13} \cdot t_y^2}{2}$	$8,041 \cdot 10^{-3}$	$6,035 \cdot 10^{-3}$
Перемещение индуктора с пригрузом перед ударом x_2 , м	$x_{2(t_y)} = \frac{a_2 \cdot t_y^2}{2}$	$1,953 \cdot 10^{-3}$	$1,466 \cdot 10^{-3}$
Импульс якоря с ударником перед ударом N_{13} , Н·с	$N_{13} = m_{13} \cdot V_{13}$	1012	876,408
Импульс индуктора с пригрузом перед ударом N_2 , Н·с	$N_2 = m_2 \cdot V_2$	904,8	783,12
Энергия якоря с ударником перед ударом A_{13} , Дж	$A_{13} = \frac{m_{13} \cdot V_{13}^2}{2}$	1207	905,768
Энергия индуктора с пригрузом перед ударом A_2 , Дж	$A_2 = \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2}$	262,4	196,563

Случай полного выбора зазора d_I до выбора зазора δ_2 является предельным. Реальный режим соответствует ускорению якоря-ударника и пригруза при выборе зазора на меньшую величину, чтобы удар якоря-ударника по плите начался до момента выбора зазора d_I . Это позволит использовать для воздействия на среду кинетическую энергию движения якоря. Скорость якоря за время формирования волны уменьшится, и уменьшатся механические напряжения при ударе собственно якоря об индуктор. Кроме этого, при ударе якоря-ударника по плите-излучателю в этом случае будет продолжать действовать сила электромагнита.

Для оценки механических параметров (табл. 3.1) в случае, когда $\delta_I > \delta_2$ примем, что свободное ускорение якоря-ударника и пригруза происходит на выборе зазора на величину $d_2 = 0,75 \cdot d_I$, то есть $d_2 = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м. После этого якорь-ударник ударится о плиту-антенну и переместится вниз, испытывая сопротивление нагрузки за счет создания сейсмической волны, после чего должно произойти ударное взаимодействие якоря с индуктором и начнется движение якоря вверх в направлении движения индуктора с пригрузом. Ударник m_3 будет при этом продолжать движение вниз вместе с приведенной массой воды. Затем он должен упереться в механические ограничители,

предусмотренные в конструкции для защиты от разрыва мембраны герметизирующей плиту излучателя с корпусом установки.

Таким образом, после ускорения при выборе зазора $\delta_2 = 0,75 \cdot \delta_1 = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м масса m_{13} со скоростью V_{13} наносит удар по плите-излучателю диаметром $D=0,8$ м. Примем, что ударное взаимодействие с плитой имеет характер кратковременного неупругого удара. Это позволяет сделать оценку скорости массы m_{13} и плиты m_4 ($m_4 \approx 78$ кг), которую они будут иметь после удара и с которой начнется их воздействие на воду под плитой. Из закона сохранения механического импульса

$$V_0(m_{13} + m_4) = V_{13} \cdot m_{13}. \quad (3.21)$$

где V_0 – скорость движения m_{13} и m_4 после удара.

$$V_0 = V_{13} \cdot \frac{m_{13}}{m_{13} + m_4} = 2,067 \cdot \frac{424}{424 + 78} = 1,746 \text{ м/с}. \quad (3.22)$$

Кинетическая энергия движения масс m_{13} и m_4 после удара

$$A_0 = \frac{(m_{13} + m_4)V_0^2}{2} = \frac{424 + 78}{2} \cdot 1,746^2 = 765 \text{ Дж}. \quad (3.23)$$

Эта энергия меньше энергии $A_{13}=906$ Дж на значение

$$A_{13} - A_0 = 906 - 765 = 141 \text{ Дж}. \quad (3.24)$$

При абсолютно неупругом ударе энергия 141 Дж должна выделиться в тепловую. Реальная картина ударного взаимодействия будет более сложной, поскольку на процесс удара будет влиять сила электромагнита, продолжающая действовать на массу m_{13} , и реакция водной среды под плитой, препятствующая нарастанию скорости плиты m_4 . По скорости V_0 и при известном диаметре излучающей плиты-антенны можно сделать оценку развиваемого в воде под плитой усилия. Решение этой задачи известно в двух вариантах. А.А. Харкевич дает решение задачи для случая воздействия на воду через отверстие в жестком экране [77]. Реакция упругого полупространства на плиту-антенну (излучатель) дается им в виде

$$F = U_0 \cdot w \cdot \frac{2}{p} \cdot \left(\arccos\left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot a}\right) - \frac{c \cdot t}{2 \cdot a} \sqrt{1 - \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot a}\right)^2} \right) \quad (3.25)$$

где U_0 – начальная объемная скорость движения излучателя ($U_0 = \text{const}$);

a – радиус излучателя;

c – фазовая скорость распространения волн;

$w = r \cdot c$ – волновое сопротивление среды.

Учитывая, что $U_0 = V_0 \cdot \pi \cdot a^2$,

$$F = V_0 \cdot p \cdot a^2 \cdot r \cdot c \cdot \frac{2}{p} \cdot \left(\arccos\left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot a}\right) - \frac{c \cdot t}{2 \cdot a} \sqrt{1 - \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot a}\right)^2} \right) \quad (3.26)$$

В момент начала удара ($t = 0$) сила реакции максимальна

$$F_{(t=0)} = V_0 \cdot p \cdot a^2 \cdot r \cdot c. \quad (3.27)$$

и через время $t = \frac{2a}{c}$ снижается до нуля (при постоянной скорости V_0 движения масс m_{13} и m_4). Относительное значение силы реакции

$$F^*(t) = \frac{F}{F_{(t=0)}} = \frac{2}{P} \cdot \left(\arccos\left(\frac{t}{2}\right) - \frac{t}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{t}{2}\right)^2} \right), \quad (3.28)$$

где $t = \frac{c \cdot t}{a}$ – относительное значение расстояния пробега волны к радиусу излучателя, $t \in (0,2)$. При $t = 2$ формирование волны завершается, поскольку сила реакции воды на излучатель снижается до нуля.

На рис. 3.5 показано изменение F^* в зависимости от параметра $t = \frac{c \cdot t}{a}$ и от относительного времени

$$t^* = \frac{t}{t_n} = \frac{t}{2}, \quad (3.29)$$

где $t_n = \frac{2a}{c}$ – время пробега волны на расстояние, равное диаметру излучателя и характеризующее время снижения развиваемого под плитой-антенной усилия от максимального до нулевого значения.

Нелинейность зависимости реакции нагрузки от относительного времени t^* не позволяет ее использования для аналитической оценки реакции среды с энергетической точки зрения, тем более, что реакция среды не учитывает (по [77]) снижение скорости движения масс m_{13} и m_4 за время удара по среде. Эту оценку можно сделать, если заменить зависимость $F^*(t^*)$ линейной функцией

$$F^*(t^*) = 1 - \frac{1}{0,9} \cdot t^*, \quad (3.30)$$

имеющей примерно то же самое среднее значение в течение времени $t^* = 1$.

На рис. 3.5 приведена также зависимость $F^*(t^*)$ при $V_0 \neq \text{const}$, изображенная исходя из следующих соображений. Максимальное значение $F^*(t^*=0)$ определяется начальной скоростью и радиусом плиты-излучателя и не зависит от ударной массы и, следовательно, от ее кинетической энергии. Относительное время $t^*=1$ определяется только радиусом излучателя. Следовательно, зависимость $F^*(t^*)$ с учетом снижения скорости за время импульсного воздействия на среду будет проходить ниже зависимости $F^*(t^*)$ при $V_0 = \text{const}$ на величину примерно пропорциональную снижению скорости. Исходя из такого предположения на рис. 3.5 построена приблизительная зависимость $F^*(t^*)$ с учетом снижения скорости и ее линейная аппроксимация при сохранении создаваемого значения механического импульса реакции среды.

При данных предположениях и аппроксимации реакции нагрузки линейной функцией можно сделать оценку снижения скорости масс m_{13} и m_4 за время нагружения среды импульсным давлением, и определить долю передачи кинетической энергии ударника в энергию воздействия на среду.

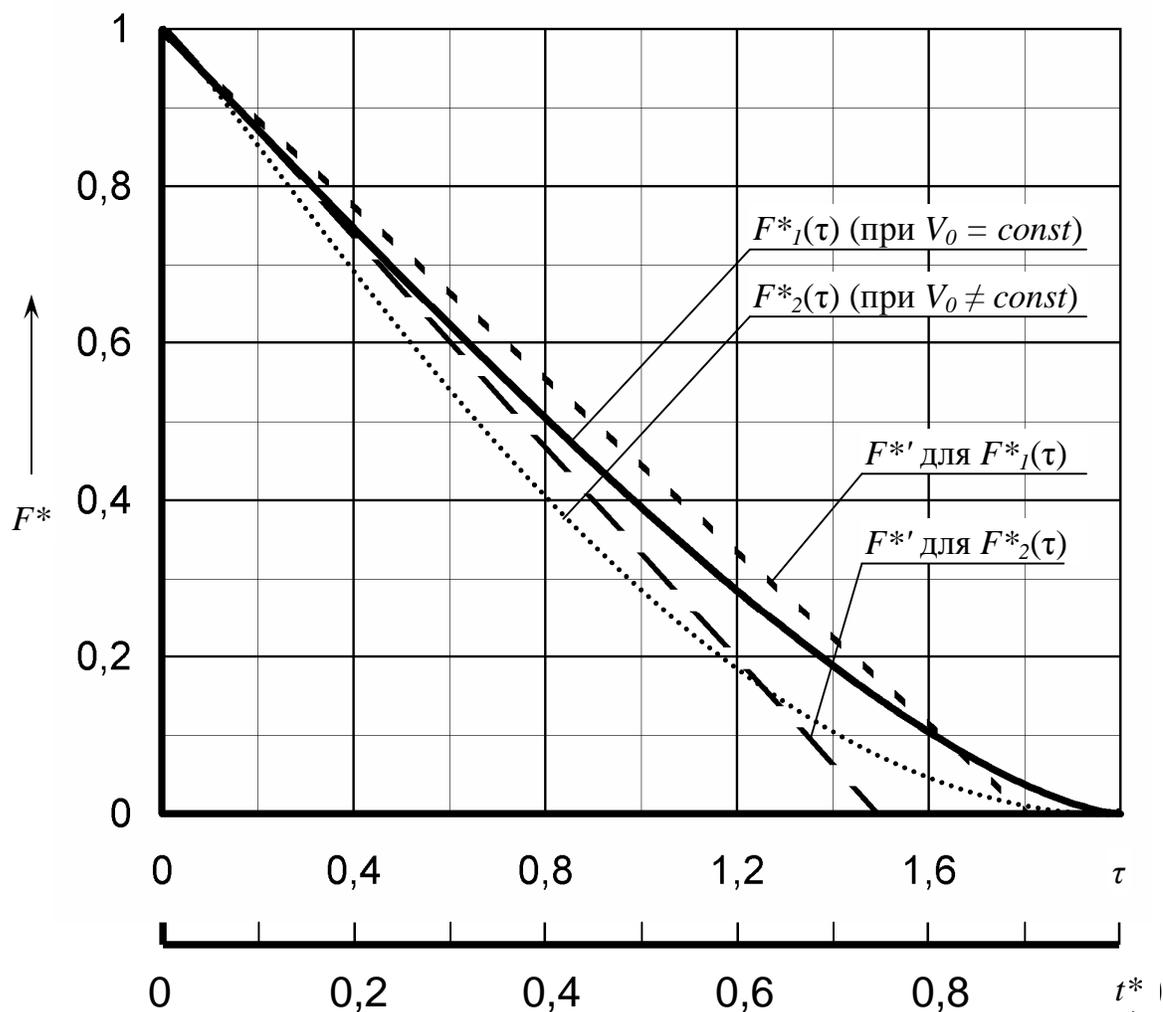


Рис. 3.5. Изменение относительной силы F^* от относительного времени t^* и аппроксимация реакции относительной силы линейной функцией.

Сделаем численную оценку энергетических соотношений с учетом принимаемых допущений. При радиусе излучателя $a = 0,4$ м время снижения реакции среды

$$t_1 = \frac{2a}{c} = \frac{2 \cdot 0,4}{1500} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Время снижения реакции среды до нуля при линейной аппроксимации с учетом снижения скорости движения масс m_{13} и m_4

$$t_{1a} = 0,75 \cdot t_1 = 0,75 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Максимальное (начальное, при $t = 0$) значение силы реакции среды

$$F_{(0)} = F_{(t=0)} = V_0 \cdot p \cdot a^2 \cdot r \cdot c = 1,746 \cdot p \cdot 0,4^2 \cdot 1000 \cdot 1500 = 1,316 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Линейная аппроксимация реакции нагрузки

$$F'(t) = F_{(0)} - \frac{F_{(0)}}{t_{1a}} \cdot t = F_{(0)} \left(1 - \frac{t}{t_{1a}} \right). \quad (3.31)$$

Уравнение движения масс m_{13} и m_4 за время удара

$$(m_{13} + m_4) \frac{dv}{dt} = F_{(0)} \left(1 - \frac{t}{t_{1a}} \right). \quad (3.32)$$

Отсюда

$$V = \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \int \left(1 - \frac{t}{t_{(0)}} \right) dt = \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_{34}} \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot t_{1a}} \right) + K. \quad (3.33)$$

При $t = 0$ $V = V_0$ и $K = V_0$.

Значит

$$V = V_0 - \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \left(t - \frac{t^2}{2t_{1a}} \right). \quad (3.34)$$

В конце ударного взаимодействия $t = t_{1a}$.

$$V_K = V_0 - \frac{F_{(0)}}{2(m_{13} + m_4)} \cdot t_{1a} = 1,746 - \frac{1,316 \cdot 10^6}{2(424 + 78)} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 1,222 \text{ м/с}. \quad (3.35)$$

Энергия движения ударной массы в конце удара

$$A_K = \frac{(m_{13} + m_4) V_K^2}{2} = \frac{(424 + 78) \cdot 1,222^2}{2} = 374,8 \text{ Дж}. \quad (3.36)$$

Эквивалентная масса $m_{эв}$ воды, вовлеченная в движение к моменту окончания (по [78, с. 67]) формирования сейсмической волны

$$m_{эв} = \frac{8}{3} r \cdot a^3 = \frac{8}{3} \cdot 1000 \cdot 0,4^3 = 170,7 \text{ кг}. \quad (3.37)$$

Энергия движения массы $m_{эв}$

$$A_{ме} = \frac{m_{эв} \cdot V_K^2}{2} = \frac{170,7 \cdot 1,222^2}{2} = 127,5 \text{ Дж}. \quad (3.38)$$

Полная кинетическая энергия в момент $t = t_{1a}$

$$A_{KK} = A_K + A_{ме} = 374,8 + 127,5 = 502,3 \text{ Дж}. \quad (3.39)$$

Уменьшение кинетической энергии за время t_{1a}

$$\Delta A = A_0 - A_{KK} = 765 - 502,3 = 262,7 \text{ Дж}. \quad (3.40)$$

Конечно, кинетическая энергия после удара составляет большую часть кинетической энергии движения A_0 массы $m_{13} = m_1 + m_3$ после удара ударника с якорем по плите и излучателю

$$\frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\% = \frac{262,7}{765} \cdot 100\% = 34,3\%. \quad (3.41)$$

Отсюда видно, что повысить эффективность установки возможно уменьшением послеударной кинетической энергии.

Предполагается, что энергия ΔA излучилась в виде сейсмической волны за время t_{1a} .

Средняя мощность излучения

$$P_{cp} = \frac{\Delta A}{t_{1a}} = \frac{262,7}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 656,7 \cdot 10^3 \text{ Вт} \text{ (} 656,7 \text{ кВт)}. \quad (3.42)$$

Определим перемещение плиты-излучателя в течение времени воздействия на него ударником

$$x_4 = \int V dt = \int \left[V_0 - \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \left(t - \frac{t^2}{2t_{1a}} \right) \right] dt = V_0 t - \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{6t_{1a}} \right) + K_x. \quad (3.43)$$

При $t = 0$ $x_4 = 0$ и $K_x = 0$.

Значит

$$x_4 = V_0 t - \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{6t_{1a}} \right). \quad (3.44)$$

К концу ударного импульса ($t = t_{1a}$)

$$x_{(t_{1a})} = V_0 \cdot t_{1a} - \frac{F_{(0)}}{m_{13} + m_4} \cdot t_{1a}^2 \cdot \frac{1}{3} = 1,746 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} - \frac{1,316 \cdot 10^6}{424 + 78} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^{-3})^2}{3} = 0,489 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Объемное возмущение, вносимое в среду за время t_{a1} ударного взаимодействия

$$V = x_{(t_{a1})} \cdot \frac{\rho D^2}{4} = 0,489 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\rho \cdot 0,8^2}{4} = 0,246 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 0,246 \text{ дм}^3 \quad (246 \text{ см}^3). \quad (3.45)$$

Доля энергии, передаваемая в нагрузку за время t_{a1}

$$h = \frac{\frac{(m_{13} + m_4) \cdot V_K^2}{2}}{\frac{(m_{13} + m_4)^2}{2}} = \frac{V_K^2}{V_0^2} = \frac{1,222^2}{1,746^2} = 0,49. \quad (3.46)$$

Электромагнитная энергия, создаваемая в зазоре электромагнита при разряде на его обмотку возбуждения

$$A_f \approx F_{эм} \cdot d_1 = 15 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1500 \text{ Дж.} \quad (3.47)$$

Таким образом, максимально возможный, при заданных параметрах КПД передачи электромагнитной энергии в сейсмическую

$$h_{f,\Delta A} = \frac{\Delta A}{A_f} \cdot 100\% = \frac{262,7}{1500} \cdot 100\% = 17,5\% \quad (3.48)$$

Из предварительных вышеприведенных оценочных расчетов следует, что основные "резервы" повышения КПД заключаются в обеспечении режима, при котором при ударе увеличивался бы коэффициент передачи кинетической энергии ударника в сейсмическую. Для этого необходимо находить технические решения уменьшения скорости V_K (отношения $\frac{V_K}{V_0}$).

Следует отметить, что оценочные расчеты основываются на результатах работы Харкевича [77] об ударе по экранированной поверхности воды. Эта же задача решалась при ударе по поверхности, которая не имеет жесткого экрана [78, с. 103].

Естественно, что в последнем случае создаваемые в воде давления существенно быстрее снижаются со временем. Следовательно, техническое решение об экранировке поверхности дном транспортного средства следует считать правильным.

Однако при длительности ударного воздействия на среду в $0,5 \cdot 10^{-3}$ с трудно ожидать, что спектр сейсмических колебаний будет вполне удовлетворителен для проведения сейсмических работ на нефть и газ. Возможно, что высокочастотный спектр сейсмического сигнала (в случае его получения) будет полезен для решения специальных сейсморазведочных задач. Поэтому целесообразной представляется работа на увеличенной длительности

ударного воздействия хотя бы до $(2-3) \cdot 10^{-3}$ с. Естественно, что максимальные давления в воде при этом существенно уменьшатся. Режимы удара через упругость и давления преследуют эту цель.

В реальной установке сейсмоисточника "Аква" была предусмотрена возможность осуществления *упругого* ударного взаимодействия между ударником и излучающей плитой. Обоснованием к использованию дополнительной упругости может также служить следующее соображение.

В общем случае частично-упругого взаимодействия перед моментом удара ударный импульс

$$S = (1 + K) \cdot \frac{m_2 \cdot m_a}{(m_2 + m_a)} \cdot v_1, \quad (3.49)$$

где $m_a = m_1 + m_3$ - масса якоря с ударником;

v_1 - предударная скорость массы m_a ;

K - коэффициент восстановления при ударе.

Из (3.49) следует, что при неупругом ударе ($K = 0$) ударный импульс вдвое меньше, чем при упругом ($K = 1$).

Описание особенностей работы при режиме упругого удара сделаем с использованием механической схемы (рис. 3.6).

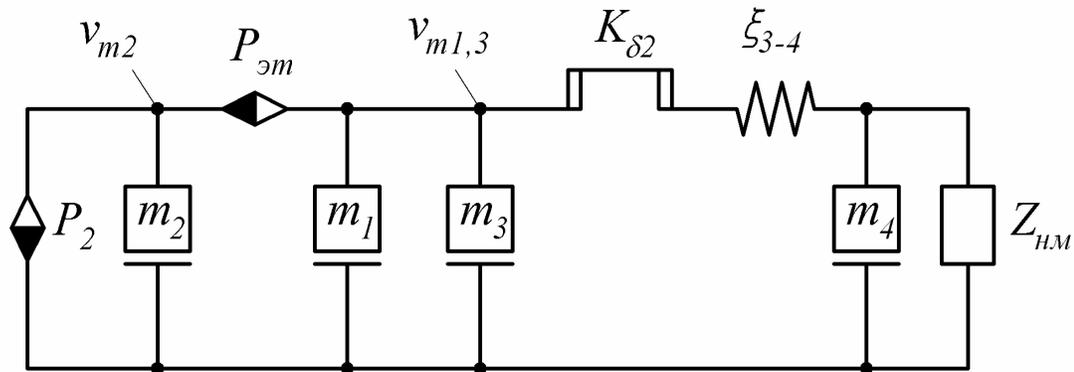


Рис. 3.6. Механическая цепь при упругом ударе ударника по излучающей плите.

При ускорении якоря-ударника ($m_1 + m_3$) ключ $K_{\delta 2}$ разомкнут. Затем якорь-ударник после свободного ускорения на части зазора δ_1 начинает взаимодействовать с упругой пластиной (например, резиновой или полиуретановой). Этому моменту соответствует замыкание ключа $K_{\delta 2}$. Скорость v_{m13} масс $m_1 + m_3$ начинает действовать на сжатие податливости x_{3-4} , по мере которого, возрастает скорость v_4 излучающей плиты m_4 и нагрузки $Z_{нэ}$. Движение пригруза m_2 при этом режиме не имеет принципиальных отличий от режима жесткого удара. Отличие лишь во времени действия силы $P_{эм}(t)$, которое увеличится из-за увеличения времени энергопреобразования в зазоре электромагнита, поскольку увеличится длительность воздействия на воду при помещении прокладки с податливостью x_{3-4} .

Наличие в схеме податливости между массами m_{13} и m_4 может привести к резонансной (наибольшей) передаче энергии в нагрузку при определенном

значении податливости χ_{3-4} , что может оказаться положительным свойством данного режима.

Сложность записи уравнений движения и их решения определяются в настоящее время сложностью анализа схем, в которые входят и дискретные (m , ξ) и распределенные (ρ , c), параметры воды как нагрузки (см. п.п. 3.2.6). По этой причине можно сделать только некоторые замечания по параметрам и предполагающимся процессам, которые целесообразно иметь в виду.

Возникает принципиальный вопрос справедливости положения о длительности создаваемого силового воздействия на акустическую нагрузку, полученного А. А. Харкевичем в виде

$$t = \frac{D}{c}, \quad (3.50)$$

где D – диаметр излучателя,
 c – скорость распространения волн.

Оно, наверно, справедливо только для случая уменьшающегося давления, что имеет место при жестком механическом ударе. При ударе же через упругость сейсмическая волна должна излучаться как минимум в течение времени нарастания давления, т.е., в основном, на фронте создаваемого импульса давления в воде, а в общем случае – при изменяющейся скорости плиты-излучателя. Поскольку скорость плиты-излучателя при воздействии через податливость будет меньше, то это должно привести и к снижению мгновенной излучаемой мощности. Вариантом воздействия на воду через податливость является случай, когда в воде под излучателем помещен объем с воздухом (шланг, "линза" и т.д.). Отличие этого варианта в том, что процессу сжатия воздуха в процессе движения излучателя предшествует жесткий удар движущимся ударником по излучателю. Этот удар рассмотрен выше как неупругий удар масс m_{13} и m_4 .

Таким образом, как показывают предварительные исследования, правильный выбор режима работы позволит обеспечивать наиболее эффективное воздействие на акустическую среду. Представляется перспективным применение режима с разгоном якоря и ударника в водных сейсмоисточниках без излучающей плиты. При этом разгон якоря и ударника возможно обеспечивать за счёт применения специального упругого воздушного устройства с регулируемым объёмом (ресивера). Зазор δ_l в электромагните источника с ударным режимом работы целесообразно иметь существенно больше, чем 5 мм, который обычно имеется в выпускаемых наземных сейсмоисточниках.

3.2. Математическая модель импульсного водного сейсмоисточника

3.2.1. Применение метода электромеханических аналогий.

При создании математической модели водного сейсмоисточника использовался метод электромеханических аналогий (МЭА). МЭА получил широкое распространение в качестве инструмента анализа электромеханических и акустических преобразователей. Основные положения и развитие метода содержатся в трудах академиков Гамбурцева Г.А., Харкевича А.А., а так же других ученых [77, 79 – 85].

Традиционность применения МЭА в указанных областях объясняется удобством использования мощных формализованных методов расчёта электрических цепей; возможностью совместного расчёта механической и электрической систем преобразователей; доступностью анализа механических процессов для специалистов-электротехников.

Одним из примеров успешного применения МЭА является анализ источников сейсмических сигналов. МЭА при этом, не только позволил изучать сложные динамические режимы работы сейсмоисточников и анализировать различные возможные модификации конструктивных схем, но и получил своё развитие и дополнение. Так, МЭА был дополнен исследованием сложных преобразовательных элементов рычажного и гидравлического типа [84], анализом цепей с изменяющейся в процессе работы топологией, введением и использованием понятия "ключ заряда" [86].

В настоящем подразделе рассмотрено составление по методу электромеханических аналогий систем уравнений, реализация их решения и анализ результатов расчётов.

3.2.2. Полная механическая цепь и её электрическая цепь-аналог.

Рассмотрим особенности построения механической и электрической цепи – аналога сейсмоисточника выполненного по приведенной выше механической системе (рис. 3.1). Механическая цепь является формализованным изображением механической системы на плоскости в виде совокупности активных и пассивных элементов, составляющих динамическую систему и условно связанных между собой линиями взаимного влияния сил и скоростей, возникающих в результате внешнего воздействия. Механическая цепь отражает все энергетические процессы, происходящие в механической системе. Линии соединения между отдельными элементами цепи обеспечивают идеальную, т.е. без потерь энергии, передачу усилий или скоростей между элементами.

Механическая цепь с достаточной для практических целей точностью соответствующая свойствам источника сейсмических колебаний приведена на рис. 3.7 и содержит инерционные элементы m_1 , m_2 , m_3 и m_4 моделирующие соответствующие массы (рис. 3.1). Параллельно каждому инерционному элементу включены источники силы P_1 , P_2 , P_3 и P_4 моделирующие силы веса каждого из элементов относительно инерциальной системы отсчета.

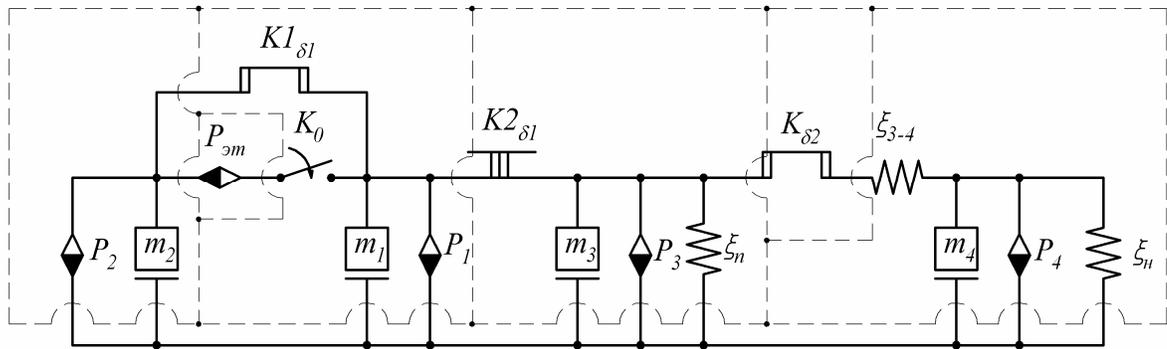


Рис. 3.7. Механическая цепь сейсмоисточника.

Направление действия сил веса (зачерненная сторона ромба) показано к узлу цепи соответствующей инерциальной системе. Электромагнитная сила $P_{эм}$ действует между якорем и индуктором, закрепленным на пригрузочной массе, что соответствует ее включению между полюсами указанных инерциальных элементов. Как показано в п.п. 2.2.2, для математического моделирования допустимо использовать функцию силы с прямоугольным фронтом. Полярность источника силы $P_{эм}$ проставляется с учетом направления действия этой силы относительно направления сил веса масс, а при их отсутствии – с учетом действия других источников силы имеющих в данной системе. В механической системе сила $P_{эм}$ действует на массу m_1 вниз, а на массу m_2 вверх, такое направление совпадает с направлением действия силы веса P_1 . Следует отметить наличие элемента ξ_n который моделируют нагрузку – водную среду, прилегающий к излучателю сейсмоисточника. В общем случае жидкость представляет собой сложную нагрузку, характеризуемую распределенными параметрами и свойством текучести. Однако для первого приближения и изучения крайних режимов работы сейсмоисточника можно ввести эквивалентные сосредоточенные параметры податливости и, если предполагается учесть потери энергии на частично упругое взаимодействие, – сопротивления трения. Такое упрощение допустимо, если рассматривается задача анализа функционирования механической системы сейсмоисточника без вопросов о волновых процессах в нагрузке.

Особенностью работы механической системы импульсных сейсмоисточников является наличие ударных процессов. Ударные процессы могут иметь различный характер: неупругий удар и упругий удар, а, также, частично упругий удар (общий случай). Поскольку ударный процесс сопровождается преобразованием кинетической энергии в энергию потенциальную (упругий удар) или в тепловую (неупругий удар), а его момент (начало) предваряется движением массы на определенном расстоянии, по прошествии которого наступает ударное взаимодействие, то отображать его в механической цепи целесообразно некоторым ключевым элементом, отражающим предварительное перемещение соударяющихся элементов. Это необходимо для составления математической модели устройства с присутствием ударов. На рис. 3.8 предлагается условное обозначение

ключевого элемента, устанавливающего (и разрывающего) связь между подвижными полюсами других элементов после определённых перемещений в механической системе.

Ключ $K1_{dl}$ (рис. 3.7) в исходном состоянии нормально разомкнут, что соответствует наличию зазора между якорем и индуктором ЭМД. Замыкание ключа K_{dl} происходит после прохождения подвижными полюсами элементов расстояния x , равного величине зазора между якорем и индуктором, при этом замкнутое состояние

ключа будет означать равенство скоростей элементов между полюсами которых он включен, а также исключение влияния на механическую систему силы электромагнитного взаимодействия между якорем и индуктором. Ключ $K2_{dl}$ в исходном состоянии нормально замкнут, что соответствует наличию связи между якорем и стойками ударника. Его размыкание связано не только с перемещением якоря и ударника (движущихся совместно), но и с перемещением индуктора с пригрузом. И именно "снятие" якоря со стоек ударника индуктором, движущимся вверх, моделируется размыканием этого механического ключа. Коммутация указанных ключей происходит одновременно и соответствует моменту выбора зазора между якорем и индуктором электромагнита, т.е. определённой величине **перемещения** элементов системы. Состояние ключа K_{d2} определяется величиной свободного хода ударника, т.е. зазором d_2 между ударником и упругостью излучающей плиты.

В электрической цепи-аналоге перемещение полюсов соответствует **заряду**, протекающему по определённому участку схемы.

Система аналогии "сила – напряжение" изменяет топологию механической цепи при преобразовании в электрическую: контура преобразуются в узлы, а узлы – в контура. Это видно на примере преобразования схемы приведённой на рис. 3.7, где штриховой линией показана топология электрической схемы-аналога, получающейся из данной схемы дуальным перестроением.

Для получения электрической цепи – аналога (рис. 3.9) приведённой выше механической цепи (рис. 3.7) после дуального перестроения в её ветви

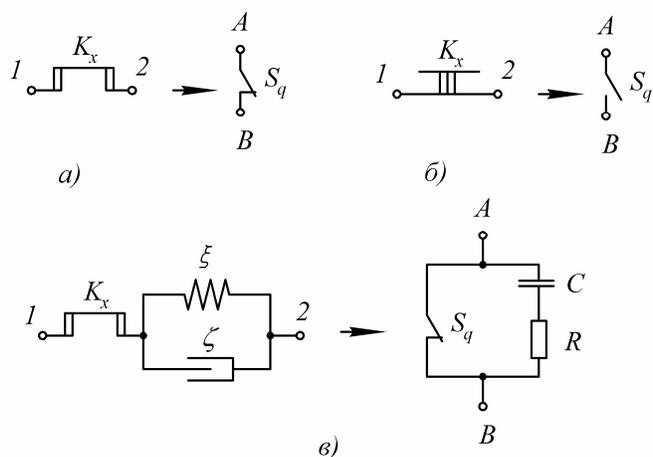


Рис. 3.8. Условные обозначения механических "ключей заряда" и их электрических аналогов: а – нормально разомкнутый (устанавливающий связь между полюсами элементов) ключ; б – нормально замкнутый (разрывающий связь между полюсами элементов) ключ; в – аналогия цепей при частично упругом ударе (общий случай).

были подставлены электрические элементы – аналоги соответствующих механических элементов.

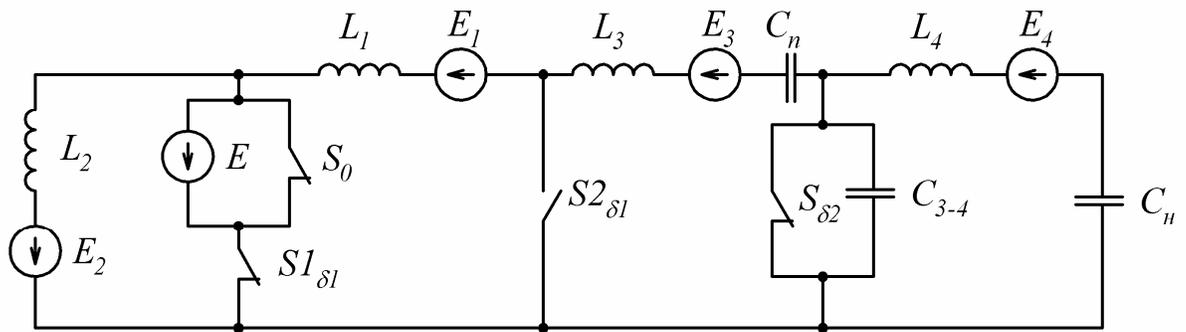


Рис. 3.9. Электрическая цепь-аналог в общем виде.

3.2.3. Электрические цепи для различных интервалов линейности.

Принимая во внимание отмеченную выше особенность работы электромеханической системы, связанную с наличием ключевых элементов, можно значительно упростить составление и решение математической модели за счёт разбиения всего цикла срабатывания на так называемые интервалы линейности. Интервалы линейности характеризуются и различаются тем, что каждому из них соответствует неизменная топология механической цепи и её электрической цепи-аналога. При этом можно упростить внешний вид схем, характеризующий каждый из интервалов, заменой соответствующих ключей на разрывы, либо коротки. В таком подходе необходимы чётко сформулированные условия перехода между интервалами и корректная передача начальных условий в каждый последующий интервал линейности.

Для составления систем уравнений и получения вспомогательных данных (начальных условий, условий перехода) были получены электрические схемы соответствующие возможным состояниям системы. Эти схемы приведены на рис. 3.10 - 3.14. На них, для дальнейшего составления систем уравнений с применением законов Кирхгофа, обозначены выбранные (и неизменные далее) направления обходов контуров и падений напряжений на элементах. Также приведена краткая информация, определяющая особенность каждого из интервалов.

а) Исходное состояние ($i_l = 0$)

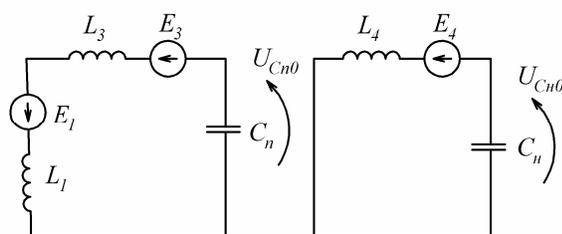


Рис. 3.10. Электрическая цепь-аналог для исходного состояния.

б) Интервал действия силы электромагнита (до выбора любого из зазоров (d_1, d_2)). Интервал начинается с размыкания ключа S_0 .

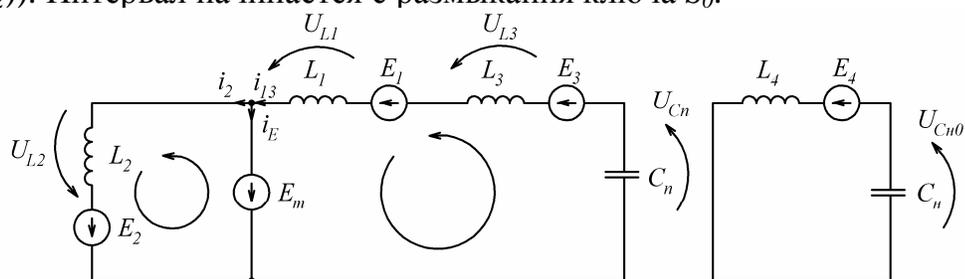


Рис. 3.11. Электрическая цепь-аналог для первого интервала.

в) Интервал после выбора зазора в электромагните (d_1). $S1_{d1}$ – размыкается, а $S2_{d1}$ – замыкается, инициируя начало интервала.

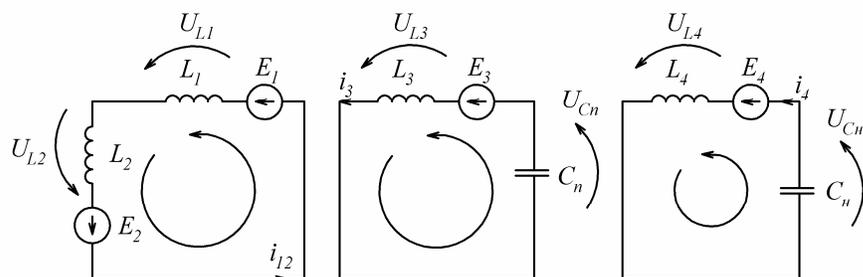


Рис. 3.12. Электрическая цепь-аналог для второго интервала.

г) Интервал начинается при уже выбранном зазоре в электромагните d_1 после выбора зазора между ударником и упругой прокладкой излучателя (d_2). Ключ S_{d2} размыкается (удар по излучателю).

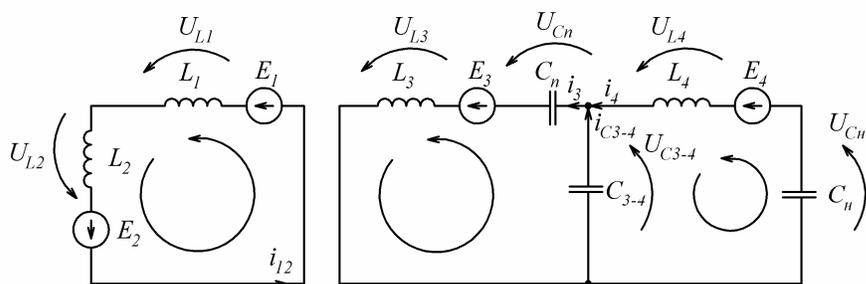


Рис. 3.13. Электрическая цепь-аналог для третьего интервала.

д) Интервал начинается, если зазор d_2 выбран до выбора зазора d_1 .

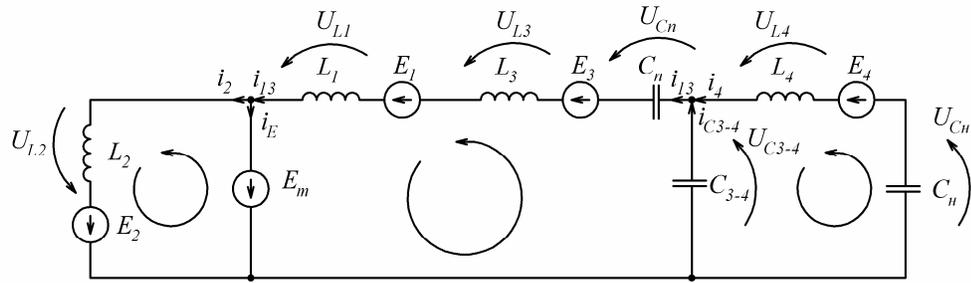


Рис. 3.14. Электрическая цепь-аналог для четвёртого интервала.

е) Интервал возникает после интервала 3, когда ударник отрывается (отскакивает) от упругости излучателя. При этом схема эквивалентна схеме интервала 2, но с другими начальными условиями.

3.2.4. Составление систем уравнений.

Для удобства определения начальных условий (НУ) и условий перехода между интервалами, а также для написания программы расчёта составили граф рассматриваемых (из возможных) переходов между интервалами (рис. 3.15).

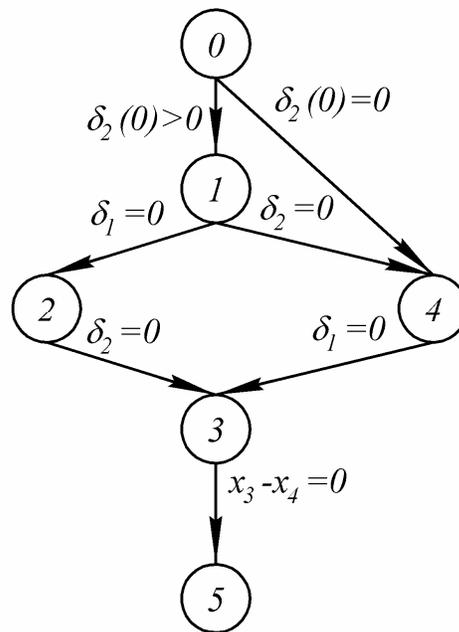


Рис. 3.15. Граф переходов между интервалами.

Ниже приведены подробные характеристики каждого из интервалов, условий попаданий и выхода из них, а также составление соответствующих систем дифференциальных уравнений.

Первый интервал.

Характеристика интервала.

Для перехода из нулевого интервала (0 @ 1).

а) Начальные условия:

- токи во всех ветвях равны нулю;

- напряжения на емкостях:

$$U_{Cn} = E_1 + E_3; \quad (3.51)$$

$$U_{Cn} = E_4. \quad (3.52)$$

б) Процессы в схеме и механической системе:

- заряд U_{Cn} ;

- действие силы электромагнита (E_m).

в) Условия выхода:

- выбор зазора d_1 ($q_1 + q_2 = q_{d1}$) \Rightarrow переход 1 \rightarrow 2;

- выбор зазора d_2 ($q_3 = q_1 = q_{d2}$) \Rightarrow переход 1 \rightarrow 4.

Уравнения для интервала.

С учётом выбранных направлений токов и напряжений, используя законы Кирхгофа можно записать:

$$\begin{cases} E_m + U_{L2} - E_2 = 0; \\ U_{Cn} + U_{L3} - E_3 + U_{L1} - E_1 - E_m = 0; \\ i_2 + i_E - i_{13} = 0. \end{cases} \quad (3.53)$$

Используя компонентные уравнения

$$U_{L2} = L_2 \frac{di_2}{dt}; \quad U_{L1} = L_1 \frac{di_{13}}{dt}; \quad U_{L3} = L_3 \frac{di_{13}}{dt}; \quad i_{13} = C_n \frac{dU_{Cn}}{dt} \quad (3.54)$$

получим систему уравнений для интервала 1 (перехода 0 \rightarrow 1):

$$\begin{cases} \frac{di_2}{dt} = \frac{E_2 - E_m}{L_2}; \\ \frac{di_{13}}{dt} = \frac{E_1 + E_3 + E_m - U_{Cn}}{L_1 + L_3}; \\ \frac{dU_{Cn}}{dt} = \frac{i_2 + i_E}{C_n} = \frac{i_{13}}{C_n}. \end{cases} \quad (3.55)$$

Второй интервал.

Характеристика интервала.

Для перехода из первого интервала (1 \rightarrow 2).

а) Начальные условия:

- произошёл жёсткий удар якоря и индуктора. После удара они рассматриваются как единая масса (сумма двух масс ($L_1 + L_2$)), движущаяся вверх со скоростью, начальную величину которой определяют по теореме сохранения импульсов:

$$m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2 = (m_1 + m_2) \cdot V_{12} \quad \Rightarrow \quad V_{12} = \frac{m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.56)$$

Для электрической схемы-аналога соответственно имеем:

$$i_{12} = \frac{L_1 \cdot i_{13} + L_2 \cdot i_2}{L_1 + L_2}; \quad (3.57)$$

- в тот же момент выбора зазора происходит разрыв связи ударника с якорем, при этом ток во втором контуре остаётся равным (как начальное условие) $i_3(+0) = i_{13}(-0)$;

- начальное напряжение на ёмкости передаётся во второй интервал из рассчитанного в первом.

б) Процессы в схеме и механической системе:

- якорь и индуктор с пригрузом свободно движутся в поле силы тяжести;

- ударник, разогнанный силой электромагнита движется к прокладке излучателя.

в) Условия выхода (2→3):

предполагая большую продолжительность движения якоря с индуктором и пригрузом, рассматриваем только один выход, по выбору зазора d_2 ($q_3 = q_{d2}$) ⇒ переход 2→3.

Уравнения для второго интервала.

Для каждого из контуров записали:

$$U_{L1} + U_{L2} - E_1 - E_2 = 0; \quad (3.58)$$

$$U_{Cn} + U_{L3} - E_3 = 0; \quad (3.59)$$

Учитывая, что

$$U_{L1} = L_1 \frac{di_{12}}{dt}; \quad U_{L2} = L_2 \frac{di_{12}}{dt}; \quad U_{L3} = L_3 \frac{di_3}{dt}. \quad (3.60)$$

получим системы уравнений для интервала 2 (перехода 1→2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{12}}{dt} = \frac{E_1 + E_2}{L_1 + L_2}. \end{array} \right. \quad (3.61)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_3}{dt} = \frac{E_3 - U_{Cn}}{L_3}, \\ \frac{dU_{Cn}}{dt} = \frac{i_n}{C_n}. \end{array} \right. \quad (3.62)$$

Третий интервал.

Характеристика интервала.

Для перехода из второго интервала (2® 3).

а) Начальные условия:

- происходит упругий удар ударника по прокладке излучателя.

При этом не происходит "некорректных" изменений в схеме (например, включение в один контур двух индуктивностей с разным начальным током или включение ёмкости на источник напряжения), поэтому все НУ будут определяться состоянием элементов в интервале 2.

б) Процессы в схеме и механической системе:

- якорь и индуктор с пригрузом продолжают движение в поле силы тяжести;

- ударник бьёт по упругой пластине излучателя, при этом скорость ударника падает, а излучателя нарастает, упругость сжимается.

в) Условие выхода (3→5):

– отсоединение ударника от упругости. Будем считать, что оно происходит в момент, когда упругость разжалась, т.е. восстановила свой исходный размер, при этом разность координат ударника и излучателя станет равной нулю ($q_3 - q_4 = 0$).

Для перехода из четвёртого интервала (4® 3).

а) Начальные условия:

- Во время взаимодействия с упругостью ударника (при сжатии или разжатии её) происходит выбор зазора d_l в электромагните, что подобно описанному в интервале 2 скачкообразному изменению тока в контуре L_1, L_2 .

- В остальной части схемы НУ берутся из интервала 4.

б) Процессы в схеме и механической системе:

- якорь и индуктор с пригрузом начинают свободное движение в поле силы тяжести;

- ударник взаимодействует с упругостью излучателя (на фазе нагрузки или разгрузки упругости).

в) Условия выхода (3→5):

Условие выхода аналогично уже описанному для интервала 3: $q_3 - q_4 = 0$.

Уравнения для третьего интервала.

Для каждого из контуров записали:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{12}}{dt} = \frac{E_1 + E_2}{L_1 + L_2}. \end{array} \right. \quad (3.63)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{C_{3-4}} + U_{C_n} + U_{L_3} - E_3 = 0; \\ U_{C_n} + U_{L_4} - E_4 - U_{C_{3-4}} = 0; \\ i_{C_{3-4}} + i_4 - i_3 = 0. \end{array} \right. \quad (3.64)$$

Учитывая ранее приведённые компонентные уравнения, а также, что

$$i_4 = C_n \frac{dU_{C_n}}{dt}; \quad i_{C_{3-4}} = C_{3-4} \frac{dU_{C_{3-4}}}{dt}. \quad (3.65)$$

получим системы уравнений для интервала 3 (перехода 2→3 и 4→3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{12}}{dt} = \frac{E_1 + E_2}{L_1 + L_2}. \end{array} \right. \quad (3.66)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_3}{dt} = \frac{E_3 - U_{C_{3-4}} - U_{C_n}}{L_3}; \\ \frac{di_4}{dt} = \frac{E_4 + U_{C_{3-4}} - U_{C_n}}{L_4}; \\ \frac{dU_{C_{3-4}}}{dt} = \frac{i_3 - i_4}{C_{3-4}}; \\ \frac{dU_{C_n}}{dt} = \frac{i_4}{C_n}; \\ \frac{dU_{C_n}}{dt} = \frac{i_3}{C_n}. \end{array} \right. \quad (3.67)$$

Четвёртый интервал.

Характеристика интервала.

Для перехода из нулевого интервала (0 @ 4).

а) Начальные условия:

Аналогично записанным для первого интервала:

- токи во всех ветвях равны нулю;

- напряжения на емкостях:

$$U_{Cn} = E_1 + E_3; \quad (3.68)$$

$$U_{Cn} = E_4. \quad (3.69)$$

б) Процессы в схеме и механической системе:

Это так называемый "режим давления", в котором:

- ударник сразу начинает взаимодействовать с упругостью излучателя, так как якорь непосредственно связан с ударником;

- выбирается зазор δ_1 в электромагните за счёт движения вниз якоря с ударником и движения вверх индуктора с пригрузом.

в) Условия выхода (4 → 3)

– выбор зазора d_1 .

– отброс ударника до выбора зазора d_1 , т.е. когда $x_3 - x_4 = 0$ в области практических режимов маловероятен.

Для перехода из первого интервала (1 @ 4).

а) Начальные условия:

Корректный переход, поэтому НУ берутся из расчёта первого интервала.

б) Процессы в схеме и механической системе:

Это т.н. "режим упругого удара с предварительным разгоном", в котором:

- ударник бьёт по упругости излучателя с определённой начальной скоростью неравной нулю, при этом на ударник продолжает действовать сила электромагнита (E_m);

- выбирается зазор между якорем и индуктором.

в) Условия выхода (4 → 3)

Аналогичны приведённым выше для четвёртого интервала.

Уравнения для четвёртого интервала.

Для каждого из контуров записали:

$$\begin{cases} E_m + U_{L2} - E_2 = 0; \\ U_{C3-4} + U_{Cn} + U_{L1} + U_{L3} - E_3 - E_1 - E_m = 0; \\ U_n + U_{L4} - E_4 - U_{C3-4} = 0; \\ i_E + i_2 - i_{31} = 0; \\ i_{31} - i_4 - i_{C3-4} = 0. \end{cases} \quad (3.70)$$

Учитывая приведённые ранее компонентные уравнения, окончательно запишем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_2}{dt} = \frac{E_2 - E_m}{L_2}; \\ \frac{di_{13}}{dt} = \frac{E_1 + E_3 + E_m - U_{C3-4} - U_{Cn}}{L_1 + L_3}; \\ \frac{di_4}{dt} = \frac{E_4 + U_{C3-4} - U_{Cn}}{L_4}; \\ \frac{dU_{Cn}}{dt} = \frac{i_E + i_2}{C_n} = \frac{i_{13}}{C_n}; \\ \frac{dU_{C3-4}}{dt} = \frac{i_{13} - i_4}{C_{3-4}}; \\ \frac{dU_{Cn}}{dt} = \frac{i_4}{C_n}. \end{array} \right. \quad (3.71)$$

Пятый интервал.

Характеристика интервала.

Электрическая схема-аналог будет иметь вид, аналогичный виду схемы для второго интервала. Отличие интервала состоит в том, что в контуре $E_4-L_4-C_n$ будут происходить изменения токов и напряжений и переход в интервал осуществляется без удара якоря об индуктор.

Для перехода из третьего интервала (3 @ 5).

а) Начальные условия:

Корректный переход в интервал в момент отрыва ударника от упругости излучателя. Поэтому НУ берутся из расчёта третьего интервала.

б) Процессы в схеме и механической системе:

- якорь и индуктор с пригрузом свободно движутся в поле силы тяжести;
- ударник движется в поле силы тяжести с начальной скоростью, направленной вверх, кроме того, на него действует пружина (ξ_n), которая также тянет его вверх, в начальное положение, в котором ударник прижат к упорам.

в) Условия выхода (5 → ×)

Дальнейшие процессы (возврат индуктора с пригрузом и якорем на ударник, разрыв связи якоря с индуктором, повторный удар ударника по излучателю и т.д), происходят заведомо после излучения акустической волны и поэтому здесь не рассматриваются.

Уравнения для пятого интервала.

$$\left\{ \frac{di_{12}}{dt} = \frac{E_1 + E_2}{L_1 + L_2}. \right. \quad (3.72)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_3}{dt} = \frac{E_3 - U_{Cn}}{L_3}; \\ \frac{dU_{Cn}}{dt} = \frac{i_n}{C_n}. \end{array} \right. \quad (3.73)$$

$$\begin{cases} \frac{di_4}{dt} = \frac{E_4 - U_{Cн}}{L_4}; \\ \frac{dU_{Cн}}{dt} = \frac{i_4}{C_н}. \end{cases} \quad (3.74)$$

3.2.5. Решение систем уравнений и его результаты.

Вычисления провели в математической оболочке MathCAD 2001 с возможностями программирования. Для численного решения систем дифференциальных уравнений использовали стандартную функцию данной оболочки, использующую для расчета метод Рунге – Кутты четвертого порядка с переменным шагом интегрирования:

$$\text{Rkadapt}(y, x1, x2, n, F) \quad (3.75)$$

где y – вектор начальных условий;

$x1, x2$ – моменты времени определяющие соответственно начало и конец расчетного интервала;

n – количество расчетных точек на заданном интервале;

F – вектор содержащий первые производные рассчитываемых параметров (правые части системы обыкновенных дифференциальных уравнений).

Вектор начальных условий содержит начальные значения рассчитываемых параметров.

Рассматриваемая функция возвращает матрицу, у которой количество строк равно n , а количество столбцов соответствует количеству рассчитываемых параметров плюс один (количество строк в векторе $F+1$), т.к. в первом столбце записывается момент времени соответствующий данному шагу интегрирования. Поэтому для получения более удобного результата желательно, чтобы на всех интервалах расчета количество уравнений в системах было бы одинаковым, поэтому системы уравнений для интервалов дополнили полным набором рассчитываемых параметров, даже если в процессе расчёта они не меняют своих значений и заведомо известны.

Листинг программы, составленной для расчета процессов в системе со стыковкой интервалов и применением описанной выше функции (3.75) приведён в Приложении 4.

Как уже упоминалось ранее, результаты расчёта программы представляют собой матрицу со строками соответствующими количеству расчётных точек и столбцами, соответствующими рассчитываемым параметрам, а также столбцом времени. Расчетными параметрами являются скорости и перемещения всех рассматриваемых масс, а также механические усилия, развиваемые на упругих элементах. Это позволяет строить временные зависимости этих величин, исследовать влияние различных факторов на поведение электромеханической системы и, в конечном итоге, при наличии информации о наивыгоднейших параметрах воздействия на среду, определить оптимальный режим работы самой установки при условии обеспечения указанных параметров.

В настоящее время с помощью математической модели проведены исследования водного импульсного поверхностного сейсмоисточника в двух крайних режимах. Для чего, используя общетехнический подход к изучению различных объектов (двигателей всех типов действия, преобразователей энергии и др.) выделили режимы "короткого замыкания" (КЗ) и "холостого хода" (ХХ).

Режимом КЗ предложено считать режим, в котором нагрузка не оказывает сопротивление движению исполнительного органа (по рис. 3.1 – излучающей плиты). В режиме ХХ исполнительный орган является неподвижным за счёт большой жёсткости нагрузки.

Для полноты восприятия результатов и выводов по исследованию режимов КЗ и ХХ приведена таблица основных допущений и особенностей существовавших при проведении работы.

Таблица 3.2.

Допущения и особенности исследований на математической модели

Допущение или особенность	Комментарий (цели, причины введения)
1. Исследование крайних (по нагрузке) режимов	Использование общетехнического подхода. Затруднённость моделирования нагрузки со сложными параметрами.
2. Временное постоянство силы и прямоугольность её фронта	Для упрощения расчётов и исключения из рассмотрения вторичных факторов. В реальности изменение силы во время выбора зазора не велико, а допустимость использования прямоугольного фронта показана в п.п. 2.2.2.
3. Параметрическое постоянство силы (т.е. независимость от величины зазора в электромагните)	Введено, для исключения вторичного фактора влияния силы и выделения влияния других факторов. В принципе, возможно разработка электромагнита на заданную силу в широком диапазоне величины зазора.
4. Значения масс приняты равными значениям масс в экспериментальном образце	Принято как отправная точка в исследованиях на математической модели, а также для удобства контроля "разумности" получающихся данных.
5. Не учитываются конструктивные ограничители (упоры, предельные сжатия и растяжения упругих элементов) движению составных частей установки	Введено для: - существенного упрощения расчётов; - снижения ограничений процессам, для оценки возможностей и потенциальных слабых мест установки.
6. Не учитывается трение между движущимися узлами	Для снижения трудоёмкости расчётов и исключения влияния вторичного типа.

Исследование режимов КЗ и ХХ было проведено при различных параметрах установки, со значениями и комбинациями которых можно ознакомиться по таблице 3.3.

Таблица 3.3.

Номера комбинаций параметров установки при анализе режимов КЗ и ХХ на математической модели

Комбинация значений зазоров, податливостей упругой прокладки и значение электромагнитной силы		Режим	
		ХХ ($\xi_n = 10^{-15}$ м/Н)	КЗ ($\xi_n = 10^{12}$ м/Н)
режим давления $\delta_1 = 5$ мм $\delta_2 = 0$ мм $P_3 = 25 \cdot 10^4$ Н	$\xi_{3-4} = 10^{-7}$ м/Н	1	17
	$\xi_{3-4} = 10^{-8}$ м/Н	2	18
	$\xi_{3-4} = 10^{-9}$ м/Н	3	19
	$\xi_{3-4} = 10^{-12}$ м/Н	4	20
$\delta_1 = 6$ мм $\delta_2 = 2$ мм $P_3 = 25 \cdot 10^4$ Н	$\xi_{3-4} = 10^{-7}$ м/Н	5	21
	$\xi_{3-4} = 10^{-8}$ м/Н	6	22
	$\xi_{3-4} = 10^{-9}$ м/Н	7	23
	$\xi_{3-4} = 10^{-12}$ м/Н	8	24
$\delta_1 = 9$ мм $\delta_2 = 6$ мм $P_3 = 25 \cdot 10^4$ Н	$\xi_{3-4} = 10^{-7}$ м/Н	9	25
	$\xi_{3-4} = 10^{-8}$ м/Н	10	26
	$\xi_{3-4} = 10^{-9}$ м/Н	11	27
	$\xi_{3-4} = 10^{-12}$ м/Н	12	28
ударный режим $\delta_1 = 10$ мм $\delta_2 = 10$ мм $P_3 = 25 \cdot 10^4$ Н	$\xi_{3-4} = 10^{-7}$ м/Н	13	29
	$\xi_{3-4} = 10^{-8}$ м/Н	14	30
	$\xi_{3-4} = 10^{-9}$ м/Н	15	31
	$\xi_{3-4} = 10^{-12}$ м/Н	16	32

Ниже приведены выводы, сделанные на основе анализа данных, полученных при машинном эксперименте, с параметрами согласно табл. 3.3. Так как приведение всех полученных данных не представляется рациональным (более 200 кривых), то некоторые из них будут приведены для примера при иллюстрации выводов.

Общие выводы.

1). На основании графиков для режимов ХХ и КЗ можно заключить, что величина податливости упругой прокладки между ударником и излучающей плитой имеет большое влияние на процессы, протекающие в электромеханической системе сейсмоисточника.

Например:

- **в режиме ХХ**, то есть при неподвижной, благодаря жёсткой нагрузке излучающей плите наблюдается смещение ударника с якорем. При этом, если конфигурация упругой прокладки такова, что она позволяет на значительных сжатиях оставаться на линейном участке характеристики податливости, то якорь может выбирать большую часть зазора в электромагните (рис. 3.16);

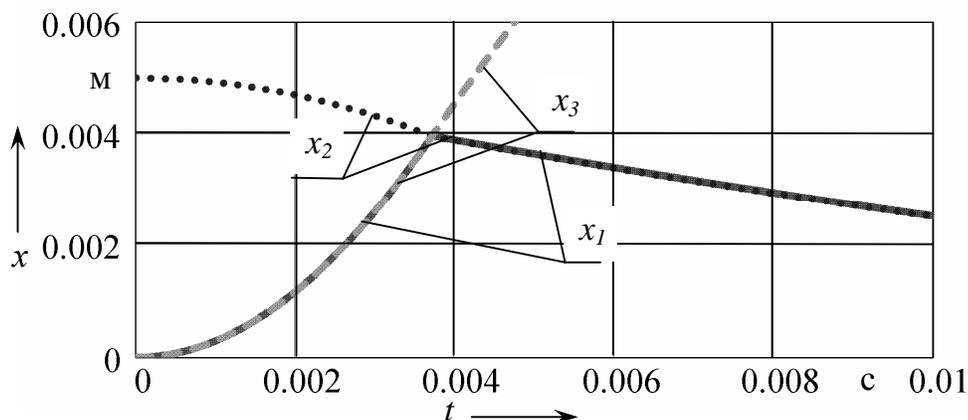


Рис. 3.16. Кривые перемещения для комбинации параметров № 1 (по табл. 3.3).

- в режиме *ХХ* прослеживается чёткая зависимость времени выбора зазора от величины податливости прокладки. Так, при изменении податливости от 10^{-7} м/Н (мягкая прокладка) до 10^{-12} м/Н (практически несжимаемая прокладка) время выбора зазора изменяется от 4-5 мс, до максимально возможного (при данных сочетаниях зазоров) значения (рис. 3.17). Это максимальное значение получается, когда выбор зазора происходит только за счёт движения индуктора с пригрузом, имеющих значительную массу;

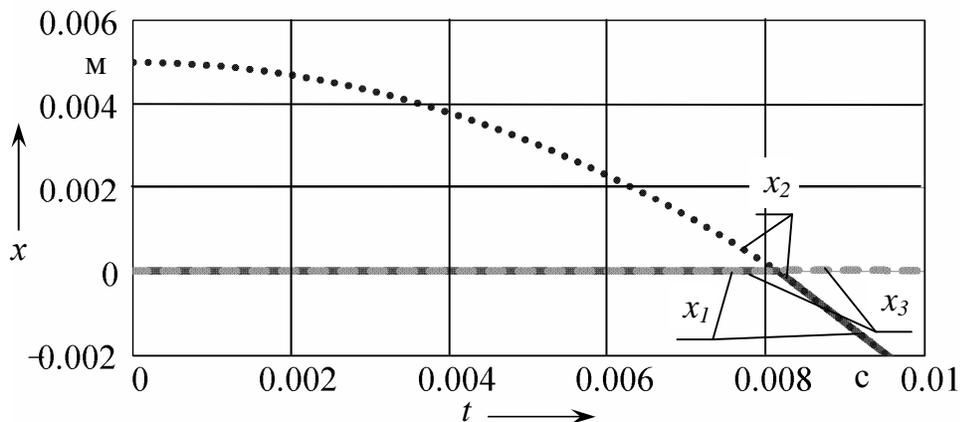


Рис. 3.17. Кривые перемещения для комбинации параметров № 4 (по табл. 3.3).

- в режиме *ХХ*, при малой податливости прокладки (а практически при её отсутствии) контакт ударника с излучающей плитой сопровождается малыми перемещениями (рис. 3.18), но большими ускорениями (порядка сотен g) ударника (по рис. 3.19). Такой теоретически полученный результат в практической интерпретации может свидетельствовать о возможности возникновения существенных перегрузок на элементах электромеханической системы и звуковом эффекте – звоне соударяющихся частей;

- в режиме *КЗ*, влияние величины податливости упругой прокладки на время выбора зазора и пройденные за это время якорем и индуктором расстояния несущественно. Это объясняется меньшим противодействием перемещению ударника, как исполнительного органа электромеханического преобразователя, работающего без сопротивления со стороны нагрузки.

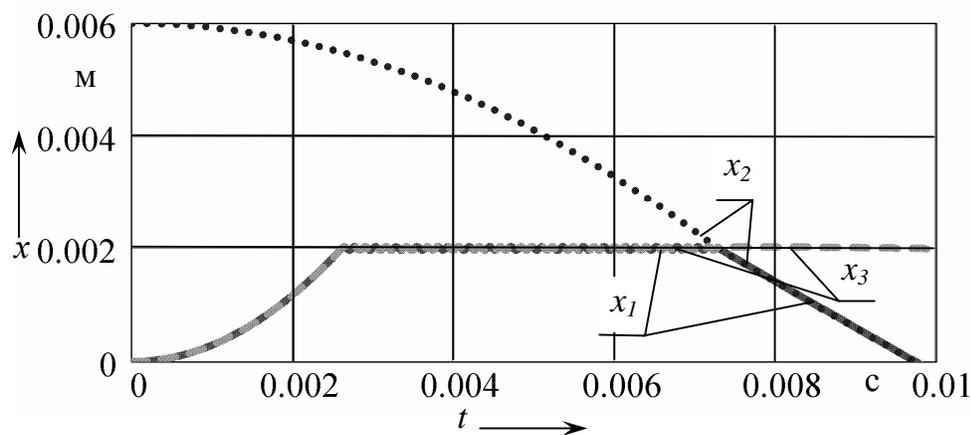


Рис. 3.18. Кривые перемещения для комбинации параметров № 8 (по табл. 3.3).

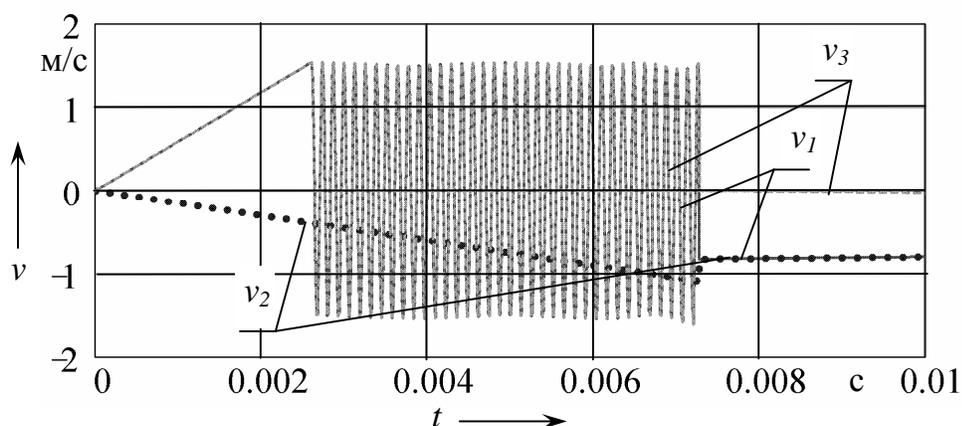


Рис. 3.19. Кривые скорости для комбинации параметров № 8 (по табл. 3.3).

- в режиме **КЗ** основным проявлением влияния величины податливости упругой прокладки является изменение поведения ударника.

2). Режим работы (давление, удар, промежуточный) также оказывает существенное влияние на процесс электромеханического преобразования.

Например:

- в режиме **ХХ**, при неизменной упругости прокладки, регулировка режима (соотношения между зазорами) позволяет изменять соотношение энергий, выбираемых якорем и индуктором с пригрузом. При этом также оказывается влияние на перемещения, скорости элементов системы и на время выбора зазора;

- в режиме **КЗ**, режим работы, определяющийся соотношением зазоров δ_1 и δ_2 , влияет на момент начала движения ударника и крутизну фронта его механических характеристик.

Характеристика режима ХХ.

1). В режиме **ХХ** при $\delta_1 < \delta_2$, в электромеханической системе сейсмоисточника наблюдаются следующие процессы:

- излучающая плита неподвижна вследствие большой жёсткости нагрузки;

- выбор зазора без упругой прокладки (или с прокладкой малой податливости) между якорем и индуктором происходит за счёт движения как индуктора с пригрузом, так и якоря с ударником;

- с увеличением податливости упругой прокладки доля якоря в выборе зазора увеличивается;

- существует область значений податливости прокладки (со стороны больших значений), в которой до выбора зазора наблюдается колебательное взаимодействие якоря, связанного с ударником с упомянутой прокладкой (рис. 3.20). То есть, упругая сила со стороны прокладки становится равной электромагнитной силе двигателя, а инерциальность разогнанной массы якоря с ударником обуславливает дальнейшее сжатие. После погашения скорости якоря (с ударником) начинается процесс разгрузки упругой прокладки вплоть до противоположного неравновесного состояния, после которого вновь начнётся сжатие. При наличии влияния электромагнитной силы, продолжающегося до выбора зазора, может произойти различное количество таких колебаний.

Таким образом, момент выбора зазора, помимо прочего, может определяться фазой колебательного взаимодействия.

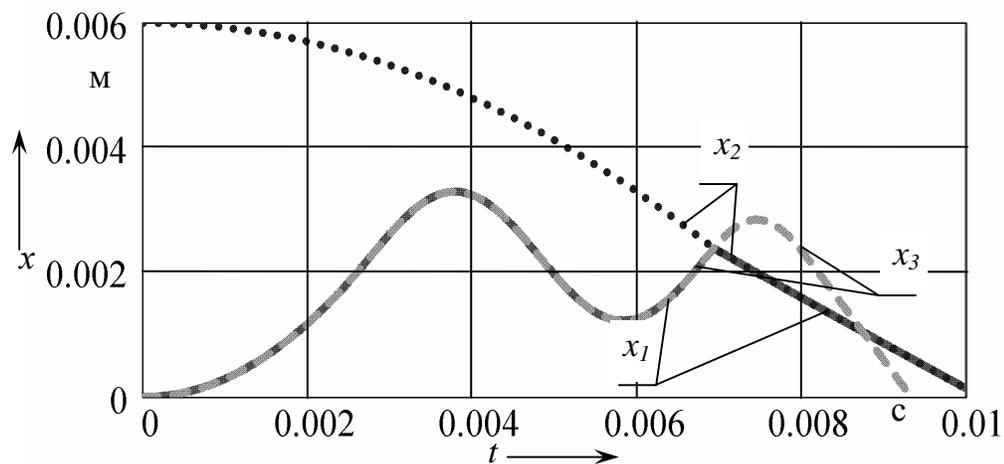


Рис. 3.20. Кривые перемещения для комбинации параметров № 7 (по табл. 3.3).

- после выбора зазора якорь, как менее инертный элемент быстро меняет свою скорость и, движется совместно с индуктором (и пригрузом) в прежнем направлении скорости индуктора. При этом якорь с индуктором удерживаются между собой электромагнитной силы, которая с момента выбора зазора прекращает влиять на другие элементы системы.

- после выбора зазора гасится скорость ударника, сжимавшего прокладку, и он отбрасывается ей в исходное положение. В случае если выбор зазора произошёл во время разгрузочной фазы колебательных движений, ударник продолжит движение в направлении перемещения индуктора с якорем, то есть в своё исходное положение.

2). В режиме XX при $\delta_1 = \delta_2$, по сравнению с описанным выше случаем $\delta_1 < \delta_2$, можно отметить следующие отличия:

- очевидно, что выбор зазора будет происходить в одно и тоже время и при одинаковых долях зазора, выбранных якорем и индуктором, вне зависимости от податливости упругой прокладки. Аналогичное наблюдается и в режиме КЗ;

- из приведённого выше отличия следует, что величина податливости упругой прокладки будет оказывать влияние только на поведение ударника после выбора зазора;

- фактически, за счёт наличия свободного выбега ударника этот режим, до выбора зазора аналогичен режиму короткого замыкания, характеризующемуся отсутствием сопротивления движению исполнительного органа (якоря с ударником).

3). Переход от режима давления к ударным режимам позволяет получить большую скорость движения якоря с ударником и, следовательно, увеличить мощность воздействия на среду. Помимо этого, при малых значениях податливости упомянутой прокладки такой переход "убирает" колебательный характер взаимодействия ударника с упругой прокладкой, исключая тем ненужную реактивную перекачку энергии между ними.

Характеристика режима КЗ

1). В режиме КЗ в электромеханической системе сейсмоисточника наблюдаются следующие процессы:

- излучающая плита практически не встречает сопротивления своему движению со стороны нагрузки;

- степень отличия механических характеристик (перемещения и скорости) движения излучающей плиты от аналогичных характеристик вызывающего это движение ударника определяется податливостью упругой прокладки. Причём чем больше величина податливости, тем больше это отличие, проявляющееся в основном в большей пологости фронта (рис. 3.21). При очень малой податливости упругой прокладки (практически – при её отсутствии) участки графиков перемещения ударника и излучателя от момента начала их

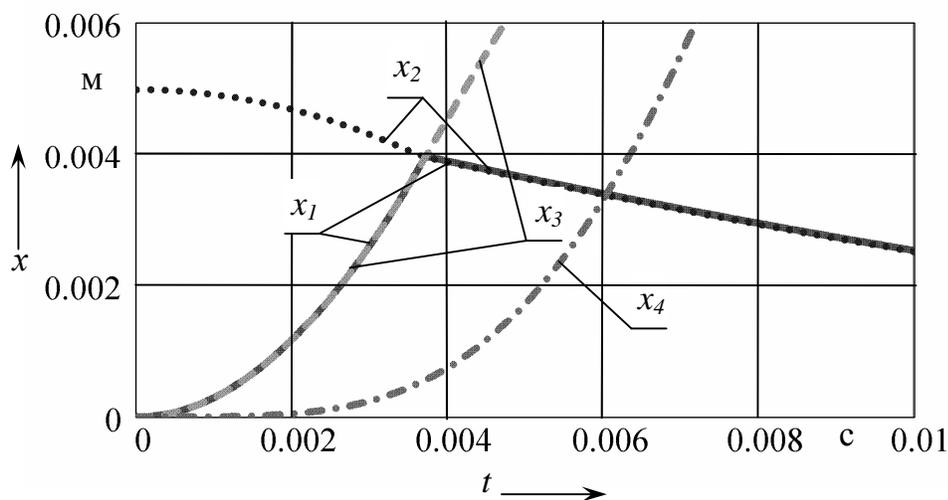


Рис. 3.21. Кривые перемещения для комбинации параметров № 17 (по табл. 3.3).

взаимодействия до выбора зазора практически совпадают;

- как следует из анализа графиков скоростей элементов электромеханической системы, в определённом диапазоне значений податливости упомянутой прокладки возможно получение фронта скорости смещения излучателя, значительно более крутого, чем фронт скорости движения якоря с ударником (рис. 3.22). Возможность получения описанного эффекта следует учитывать при исследовании вопроса об оптимизации характеристик импульса воздействия на нагрузку. Что в конечном итоге, может заметно влиять на сейсмический эффект.

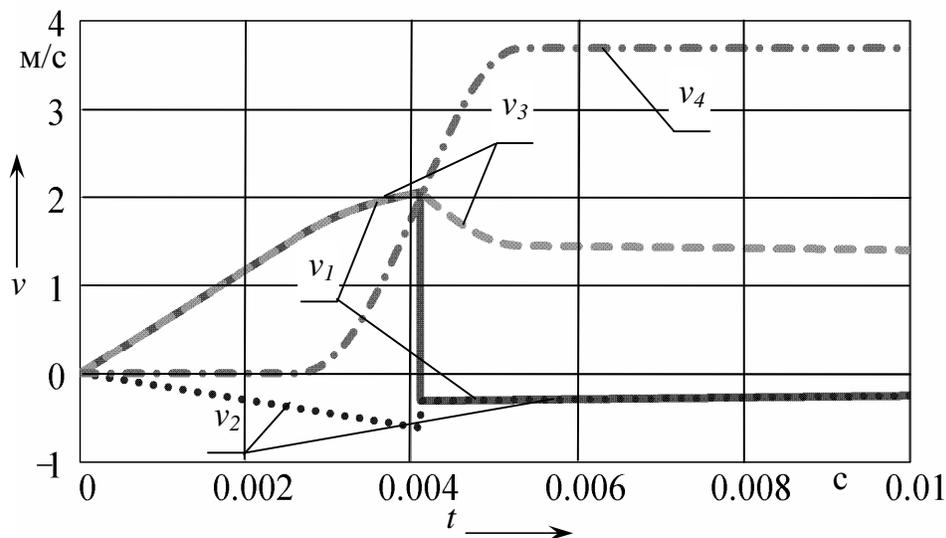


Рис. 3.22. Кривые скорости для комбинации параметров № 22 (по табл. 3.3).

3.2.6. К вопросу о водной среде как о нагрузке для водного сейсмоисточника.

Математическая модель (ММ) сейсмоисточника "Аква" создавалась для изучения динамики работы электромеханической системы установки. Наличие такой адекватной модели позволило бы изучать работу как собственно электромеханической системы установки, так и её взаимодействие с нагрузкой. Это значит, что, пользуясь моделью, можно получать информацию, во-первых, о механических характеристиках работы (перемещениях, скоростях, усилиях) и, во-вторых, через механические параметры рассчитывать процессы с энергетической точки зрения.

Кроме того, наличие ММ позволяет выполнять очень дешёвые и быстрые машинные эксперименты. Без них описать на основе натурального эксперимента работу сейсмоисточника в номинальных, спроектированных режимах можно, но полученные результаты всегда будут иметь несколько существенных недостатков:

1) измерение всех возможных механических величин (перемещений и скоростей) весьма затруднительно как по экономическим (нужно много качественных, специальных датчиков и многоканальный осциллограф), так и по техническим (затруднено крепление датчиков, необходима отстройка от механических и электрических помех и т.д.) причинам;

2) такую величину, как усилие, создаваемое на упругих элементах измерить практически невозможно. Но знать её весьма полезно, так как, например, усилие на конструктивных элементах определяют требования по их прочности, а усилие создаваемое сейсмоисточником на нагрузке – это важная косвенная характеристика его эффективности.

3) результаты натурального эксперимента всегда ограничены в небольшой области всевозможных параметров (массы составных частей, податливости упругих элементов, развиваемая сила) – заданных при разработке или определяющихся условиями работы (особенности нагрузки – среды, на которую производится воздействие). Это может привести к тому, что установка будет работать далеко не в лучшем режиме (или согласовании), а направление совершенствования может не быть очевидным.

Таким образом, адекватная ММ может дать подробное описание работы сейсмоисточника, причём как при реальных упомянутых выше, в п. 3, параметрах, так и в огромном поле их возможных значений. Например, на ММ можно применить типовой в технике подход к исследованию устройства при работе на нагрузку в крайних режимах: когда нагрузка принимается, то бесконечно податливой воздействию (т.н. режим "короткого замыкания"), то абсолютно не воспринимающей его (т.н. режим "холостого хода"). Такое исследование позволяет не только лучше представить работу установки, но и даёт возможные направления её совершенствования.

Особенности составления систем уравнений для сейсмоисточника "Аква".

ММ сейсмоисточника "Аква" заведомо имела особенности, отличающие её в более сложную сторону от ММ ранее рассмотренных типов сейсмоисточников (например, от источников типа "Енисей"). Остановимся на них подробнее.

Особенности конструктивной схемы.

Из сравнения механических систем сейсмоисточника "Аква" (рис. 2.2) и сейсмоисточников типа "Енисей" (рис. 2.1) можно отметить следующие отличия:

1) в сейсмоисточнике "Аква" четыре независимых компонента, чьи массы учитываются в расчёте в "Енисее" – три компонента;

2) в сейсмоисточнике "Аква" присутствуют упругие элементы (поз. 4 на рис. 2.2), а также, не показанная на рис. 2.2 упругость на плите-излучателе;

3) в сейсмоисточнике "Аква" два зазора (поз. 3, 9 на рис. 2.2).

Указанное увеличение числа элементов приводит к большему числу уравнений в системе, так как от числа элементов напрямую зависит число неизвестных. Появление же дополнительного зазора приводит к увеличению интервалов линейности, на которые разбивается работа установки, а также к увеличению числа возможных переходов, т.е. количества вариантов сочетаний интервалов линейности.

Последнее, может приводить к возникновению многократных переходов между состояниями системы – как бы "биению" между ними. Например, ударник, отскочив от упругости излучателя, может догнать движущиеся вверх якорь с пригрузом затем вернуться назад и отскочить вновь. Такая особенность приводит к существенному осложнению формирования траекторий перехода и увеличению времени расчёта.

Однако возможным смягчающим обстоятельством здесь может быть то, что трудности корректного перехода появляются в основном спустя значительное время от начала процессов. Когда, вероятно, излучение акустической энергии уже состоялось [77, 78], а возврат системы в исходное состояние проходит без действия силы электромагнита. В таком случае можно ограничиться достаточной частью процесса и не тратить на рассмотрение вероятнее всего несущественных последствий.

Особенности нагрузки – водной среды.

В математических моделях наземных сейсмоисточников нагрузкой установки является грунт. Конечно же, грунт это сложная нагрузка с распределёнными параметрами, однако моделируют его, в основном, одним дискретным элементом – податливостью (ёмкостью в электрической схеме-аналоге). Такое упрощение считается позволительным на основании некоторых литературных источников [например, 67] (считающих упругие свойства грунта определяющими для решаемой описанным математическим моделированием задачи). Кроме того, есть экспериментальные данные, которые не только подтверждают адекватность податливой (\leftrightarrow ёмкостной) модели нагрузки, но и дают возможность делать количественные оценки значения упругости.

Таким образом, грунт моделируется податливостью определяемой из соотношения:

$$\xi = \frac{Dx}{P_m}, \quad (3.76)$$

где Dx - перемещение полоза саней, которое может определяться экспериментально измерением датчиком перемещения;

P_m - амплитуда силы на грунте; значение может определяться как из расчёта электромагнита, так и из опыта с электромагнитом в режиме заторможенного якоря.

В результате расчёта, с указанной моделью нагрузки, получаются данные качественно, а на номинальных значениях параметров и количественно, хорошо сходящиеся с экспериментальными данными. Это даёт основания утверждать, что ММ адекватна и позволяет проводить с её помощью исследования динамики работы наземного сейсмоисточника.

До недавнего времени задач по моделированию сейсмоисточника работающего на нагрузку – водную среду не решалось. Необходимость точного (адекватного, удовлетворительного) решения новой задачи о водной нагрузке объясняется не только интересом к процессам, протекающим в ней, но и большим её влиянием на работу самой установки: как показывают предварительные результаты, при изменении параметров нагрузки существенно изменяется (вплоть до качественного изменения) общая картина работы установки. Одним из объяснений таких резких изменений является наличие сочетания индуктивных, емкостных (по электрической схеме-аналогу) элементов и ударов. Указанное сочетание может переводить систему между аperiodическими и резонансными (или околорезонансными) процессами, имеющими качественное отличие.

Подход, отработанный в моделировании наземных сейсмоисточников в рассматриваемом вопросе, очевидно, не годится по нескольким соображениям:

1) вода практически несжимаема (или сжимаема, но чрезвычайно мало (по сравнению с грунтом) и в определённых условиях). Это утверждение распространяется на случаи, когда она в ограниченном со всех сторон объёме и ей "некуда деться" от воздействия, либо когда при резком, кратковременном воздействии она не успевает вытечь (выбрызнуться) из-под воздействующего тела;

2) вода текуча, а это означает, что при относительно медленном воздействии она ведёт себя совершенно по-другому, чем при быстром. Она потребляет энергию воздействия, переводя её в кинетическую энергию текущей жидкости, т.е., по электромеханической аналогии является чисто активным сопротивлением.

Если и рассматривать изменение свойств нагрузки от слабеемкостного с присоединённой массой до чисто активного, то "как должны они меняться во времени?" и "какие значения нужно задавать?", исходно является вопросами с неизвестными ответами;

3) разница поведения установки на земле и воде становится очевидна из сравнения экспериментальных графиков перемещения излучающей плиты и ударника (п.п. 4.1.6).

Можно заключить, что из вышесказанного проявилась новая задача, которую можно сформулировать следующим образом:

сочетание преобразователя типа энергии, описываемого одномерными уравнениями механики для элементов с сосредоточенными параметрами, **с его функциональным назначением**, заключающимся в эффективном создании акустических колебаний в подвижной (вследствие свойства текучести) среде с распределёнными параметрами, **обуславливает потребность в решении соответствующих систем уравнений** объединяющих сосредоточенные механические, распределённые акустические и гидродинамические составляющие процесса взаимодействия сейсмоисточника с водной средой.

В настоящее время не обнаружено литературных и иных источников в которых рассмотрена хотя бы близкая по сути проблема.

Выводы

1. Пояснены причины и цели использования в водном сейсмоисточнике нескольких режимов работы электромеханической системы.

Дано качественное описание режимов с применением механических схем, приведены оценочные выражения для динамики работы установки.

2. С использованием выражения, полученного А.А.Харкевичем, рассмотрен вопрос о создаваемом в воде, под излучающей плитой усилии. В результате чего сделана оценка энергетических соотношений и возможности повышения эффективности установки.

3. Предложен и рассмотрен способ повышения эффективности ИЭМП сейсмоисточника с помощью ударного режима работы. Выведена зависимость КПД от параметров элементов электромеханической системы для ударного режима. Даны рекомендации к проектированию сейсмоисточников с ИЭМП.

4. Предложено математическое описание электромеханической системы водного сейсмоисточника. Математическая модель получена с помощью метода электромеханических аналогий в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы, соответствующие неизменной топологии механической цепи сейсмоисточника (интервалу линейности). Также ММ включает в себя условия перехода и принципы формирования начальных условий к расчёту каждого из интервалов.

5. Описана реализация ММ в виде рабочих таблиц системы Mathcad 2001.

6. Проведено исследование электромеханической системы сейсмоисточника "Аква" в режимах "холостого хода" и "короткого замыкания". В результате, на основе описания режимов ХХ и КЗ и рассмотрения влияния различных параметров на поведение установки, выявлены некоторые возможности установки. Кроме того, выполнен ряд рекомендаций к проектированию (модернизации) сейсмоисточников типа "Аква".

7. Отмечены особенности составления систем уравнений для сейсмоисточника "Аква". Сделана постановка новой задачи, проявившейся в ходе аналитического исследования водного поверхностного импульсного сейсмоисточника с электромагнитным приводом.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОДНОГО СЕЙСМОИСТОЧНИКА ("АКВА")

В главе приведены данные экспериментальных исследований, дополняющие и иллюстрирующие описание водного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом. Дано описание методик, условий и особенностей экспериментальных исследований. Наличием сейсмического эффекта подтверждена работоспособность и перспективность сейсмоисточника рассматриваемого типа. Определены перспективные направления совершенствования конструкции сейсмоисточника и его электромагнитного привода.

4.1. Лабораторные испытания

Целью лабораторных испытаний являлось описание сейсмоисточника на основе экспериментальных данных об особенностях работы сейсмоисточника в различных режимах.

К решению, в ходе лабораторных исследований, были поставлены следующие задачи:

- 1) определить количественные значения параметров, характеризующие работу сейсмоисточника;
- 2) определить влияние насыщения магнитопровода на силовые, электромагнитные и электрические параметры;
- 3) определить влияние форсировки (увеличения значения вводимой энергии от емкостного накопителя) на параметры работы установки;
- 4) охарактеризовать значимость различных параметров во влиянии на энергетический баланс электромеханической системы;
- 5) установить наличие и границы области максимального КПД электромеханического преобразования, а также соответствующие абсолютные значения механической энергии;
- 6) определить особенности энергетических диаграмм применительно к возможностям их использования при анализе работы сейсмоисточника;
- 7) определить влияние режима работы электромеханической системы и параметров установки на получаемые кривые тока обмотки электромагнита и магнитного потока его полюса;
- 8) оценить активное сопротивление обмотки электромагнита;
- 9) определить особенности режимов электромеханической системы;
- 10) установить наличие влияния на сейсмический результат режима работы электромеханической системы.

Реализованная программа испытаний представлена в Приложении 5.

Частично результаты лабораторных исследований приведены в [87].

В таблице 4.1. приведены характеристики использованного оборудования и вспомогательных средств.

Таблица 4.1.

Характеристики оборудования и вспомогательных средств

Наименование	Вид характеристики			
	марка	параметры	назначение	
1. Осциллограф	TDS 1012	2-х кан.	получение временных зависимостей напряжений, пропорциональных интересующим физическим величинам	
2. Мультиметр	M890	цифровой	контроль напряжений источников питания и напряжения заряда накопителя	
3. Шунт токовый	-	150А–75мВ	получение сигнала напряжения, пропорционального току обмотки электромагнита	
4. Интегрирующая цепь	резистор	-	100 кОм	получение сигнала напряжения, пропорционального магнитному потоку измерительного витка
	конденсатор	МБГТ 750 В	10 мкФ	
5. Измерительный виток	-	1 виток	получение напряжения от магнитной связи с потоком центрального полюса электромагнита для передачи в интегрирующую цепь	
6. Блоки питания	Б5-8	0-45 В	для питания плат стабилизации напряжения и управлением зарядом накопителя	
	Б5-45А	0-50 В	формирует напряжение для датчиков перемещения	
7. Система питания сейсмоисточника	-	700, 800, 850, 900, 950В, заряд: до 3 сек	обеспечение заряда накопителя до определённого напряжения за определённый интервал времени, а также стабилизация напряжения накопителя и формирование импульса тока в обмотке электромагнита	
8. Датчики перемещения (2 шт)	CLP13 -50	10кОм ±0,5% 2В/10мм	получение сигналов напряжений, пропорциональных перемещениям ударника и излучающей плиты относительно основания	

Испытания проведены в 2003 г. в Тольяттинском государственном университете.

4.1.1. Исследование в режиме заторможенного якоря.

Постоянство зазора и его величина обеспечивались размещением между якорем и индуктором немагнитных прокладок соответствующего размера.

Исследования при неподвижном якоре были направлены на:

- количественное описание параметров работы сейсмоисточников;
- установление проявления насыщения магнитной системы и возможностей форсировки;
- проверку результатов расчёта электромагнита;
- нахождение информации к анализу энергетического баланса;
- оценочный расчёт активного сопротивления обмотки электромагнита.

Полученные данные.

Перевод сигнала, снимаемого с шунта (напряжения U) в единицы измерения тока I осуществили исходя из параметров шунта (см. табл. 4.1, п.3):

$$I = U \cdot 150 / 0,075. \quad (4.1)$$

Перевод сигнала, снимаемого с выход интегрирующей цепочки (табл. 4.1, п. 4) в единицы измерения потока (Вб) осуществлялся по формуле:

$$\Phi = U \cdot R \cdot C, \quad (4.2)$$

где U – величина напряжения, В;

R – сопротивление резистора интегрирующей цепочки, Ом; $R = 100$ кОм, согласно табл. 4.1, п.4;

C – ёмкость конденсатора интегрирующей цепочки, Ф; $C = 10$ мкФ, согласно табл. 4.1, п.4.

Расчёт индукции (Тл) в зазоре произвели по формуле

$$B = \Phi / S, \quad (4.3)$$

где S – площадь полюса, поток которого измерялся;

$$S = a \cdot b = 0,38 \cdot 0,12 = 0,0456 \text{ м}^2, \quad (4.4)$$

где a и b – соответственно длина и ширина полюса; $a = 0,38$ м, $b = 0,12$ м по измерениям.

Силу, развиваемую электромагнитом, определяли по формуле:

$$F = \frac{4 \cdot S \cdot B^2}{2 \cdot \mu_0}, \quad (4.5)$$

где 4 – коэффициент, учитывающий вклады в создание силы всех полюсов электромагнита;

μ_0 – магнитная проницаемость зазора; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн /м.

Указанные в пп. 1.1. и 1.2. программы работ (Приложение 5) данные были получены, обработаны и представлены в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2.

Экспериментальные и расчётные данные для режима заторможенного якоря

Параметры при различных зазорах		Напряжение на накопителе U_C , В и соответствующая энергия накопителя, Дж (в знаменателе)				
		$\frac{700}{1225}$	$\frac{800}{1600}$	$\frac{850}{1806,25}$	$\frac{900}{2025}$	$\frac{950}{2256,25}$
Зазор 3 прокл. (~4,5 мм)	Поток Φ , мВб	80,4	88,3	91,5	94,2	96,5
	Ток I , кА	2,096	3,002	3,511	4,055	4,577
	Индукция B , Тл	1,79	1,96	2,04	2,1	2,15
	Сила P , кН	228,7	274,2	297,1	314,8	330
Зазор 4 прокл. (~6 мм)	Поток Φ , мВб	70,4	79,1	83,6	86,8	88,8
	Ток I , кА	2,247	2,795	3,182	3,599	4,062
	Индукция B , Тл	1,57	1,76	1,86	1,94	1,98
	Сила P , кН	175,9	221,1	246,9	268,6	279,8
Зазор 5 прокл. (~9 мм)	Поток Φ , мВб	54,7	62,9	66,9	70,6	73,8
	Ток I , кА	2,48	2,961	3,19	3,485	3,715
	Индукция B , Тл	1,22	1,4	1,49	1,57	1,65
	Сила P , кН	106,2	139,9	158,5	175,9	194,3

По данным табл. 4.2. построили зависимости, приведённые на рис. 4.1 – 4.4.

Были получены временные осциллограммы тока I обмотки и потока Φ полюса электромагнита – рис. 4.5 – 4.10, а также ЭД (зависимость потока от тока $\Phi(i)$) – рис. 4.11.

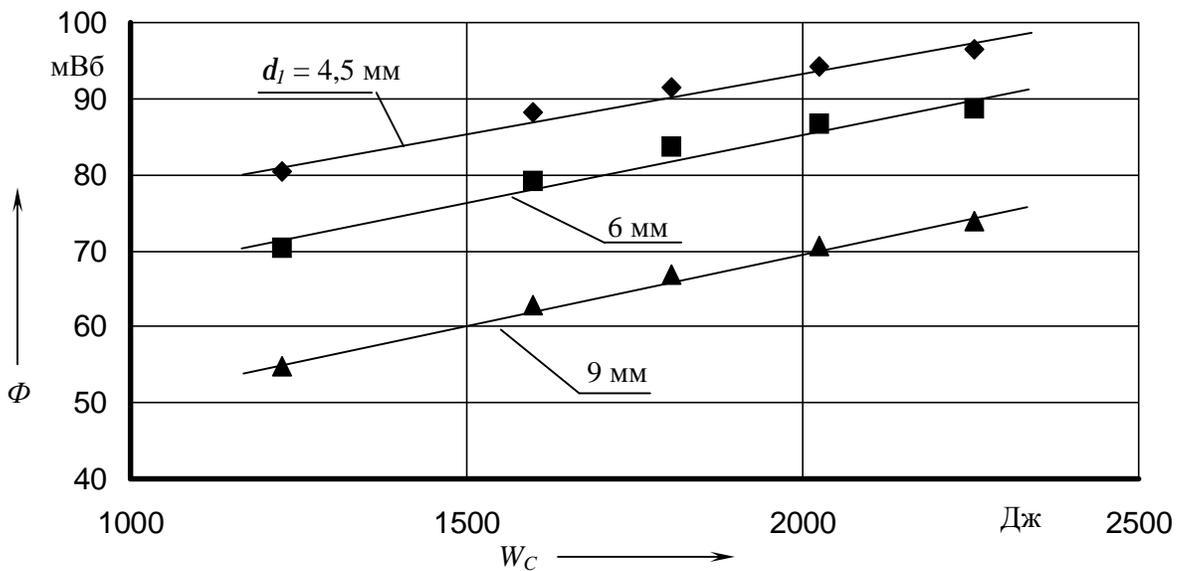


Рис. 4.1. Зависимость магнитного потока измерительного витка от начальной энергии накопителя $F = f(W_c)$ при разных зазорах между якорем и индуктором, в статике (при заторможенном якоре).

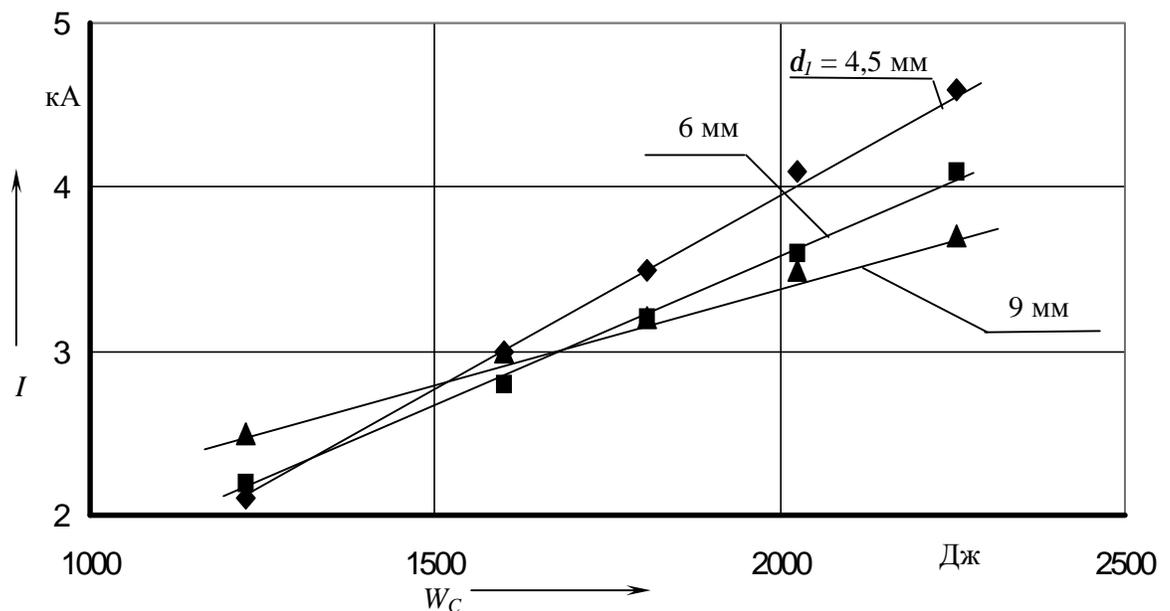


Рис. 4.2. Зависимость амплитуды тока обмотки от начальной энергии накопителя $I = f(W_c)$ при разных зазорах между якорем и индуктором, в статике (при заторможенном якоре).

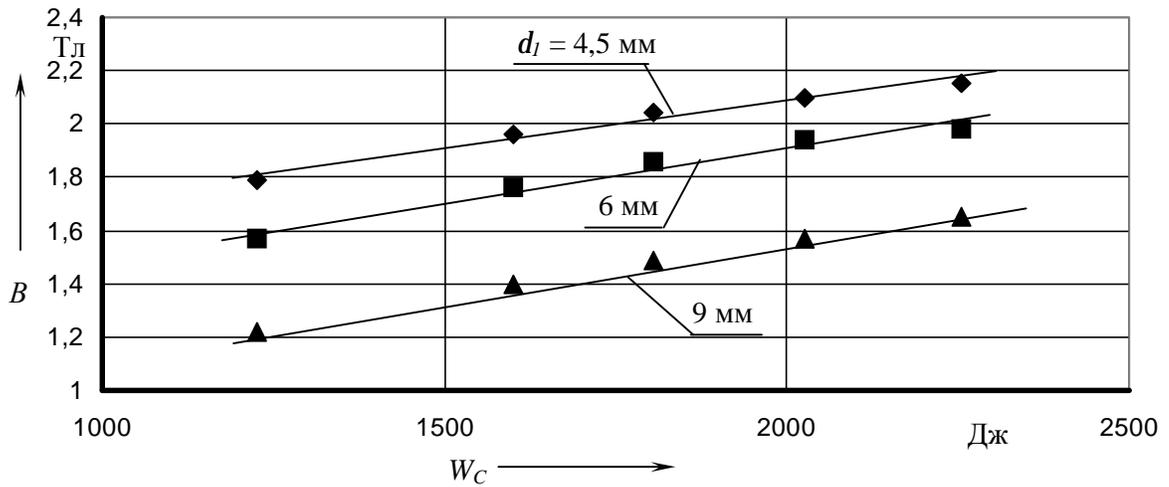


Рис. 4.3. Зависимость амплитуды индукции от начальной энергии накопителя $B = f(W_c)$ при разных зазорах между якорем и индуктором, в статике (при заторможенном якоре).

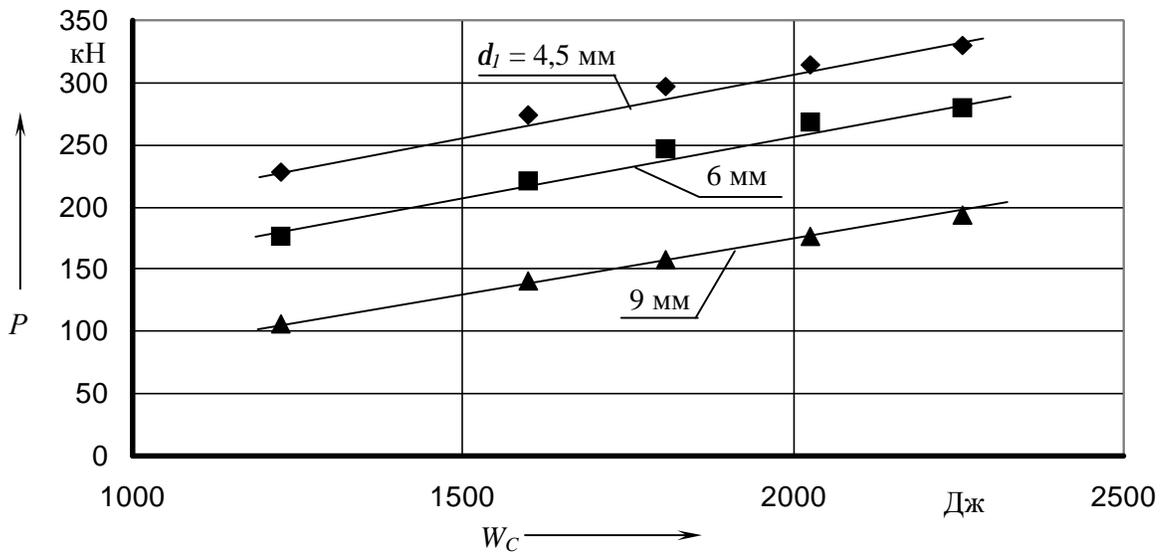


Рис. 4.4. Зависимость амплитуды силы от начальной энергии накопителя $P = f(W_c)$ при разных зазорах между якорем и индуктором, в статике (при заторможенном якоре).

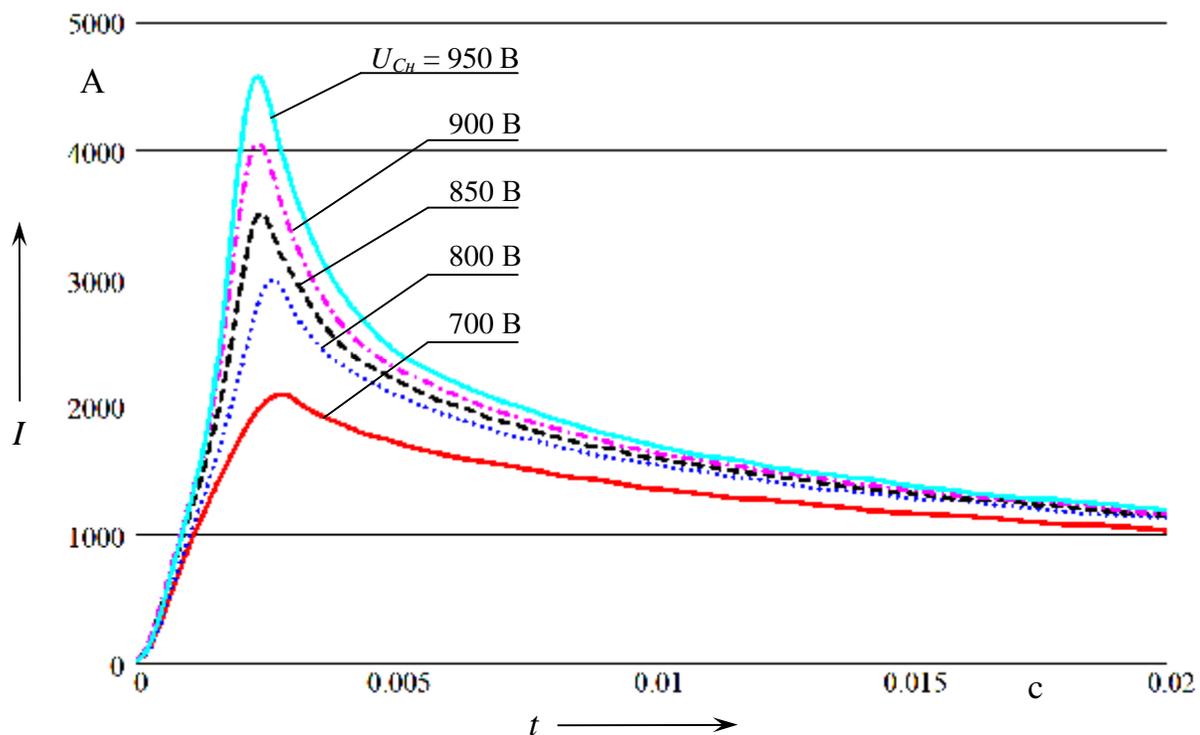


Рис. 4.5. Осциллограмма тока I обмотки для зазора 4,5 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

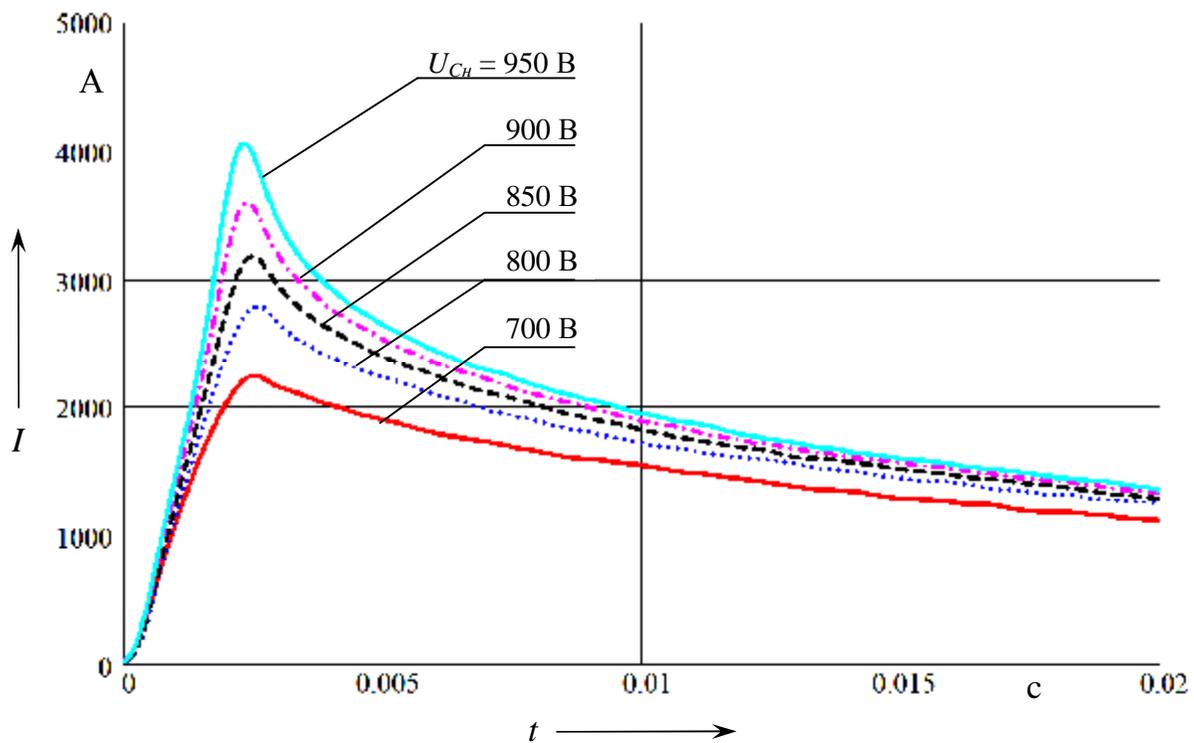


Рис. 4.6. Осциллограмма тока I обмотки для зазора 6 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

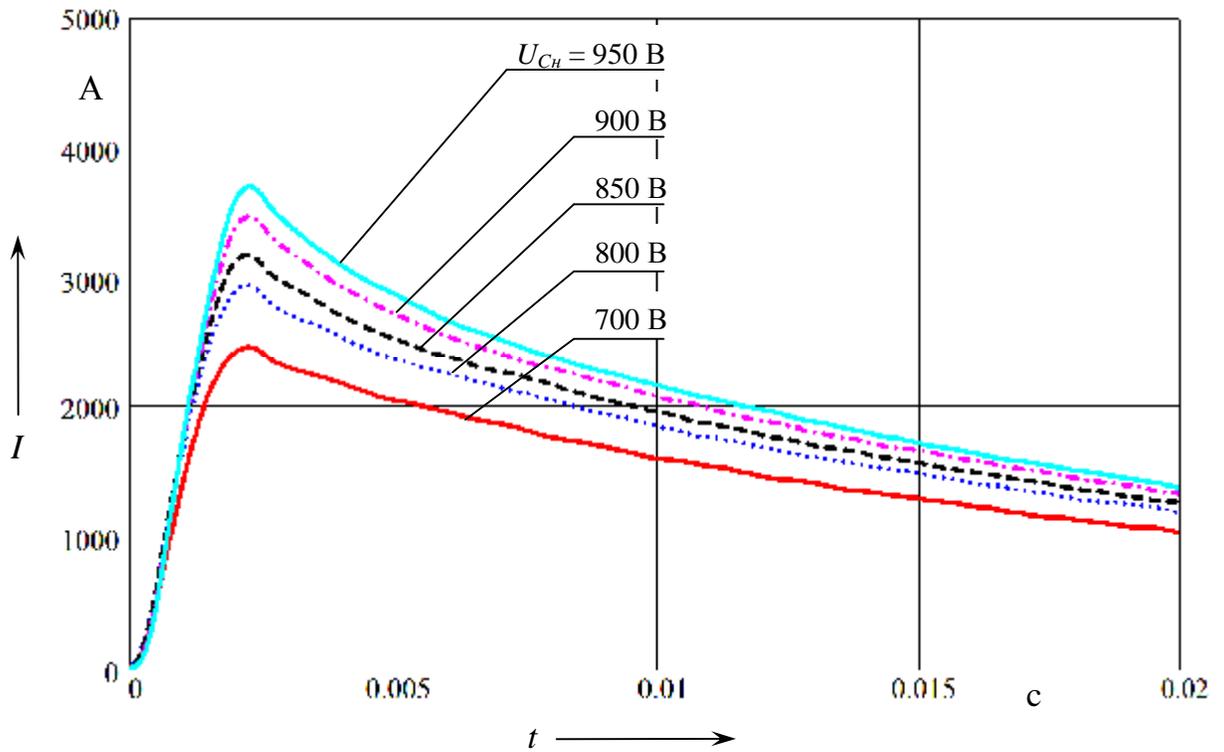


Рис. 4.7. Осциллограмма тока I обмотки для зазора 9 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

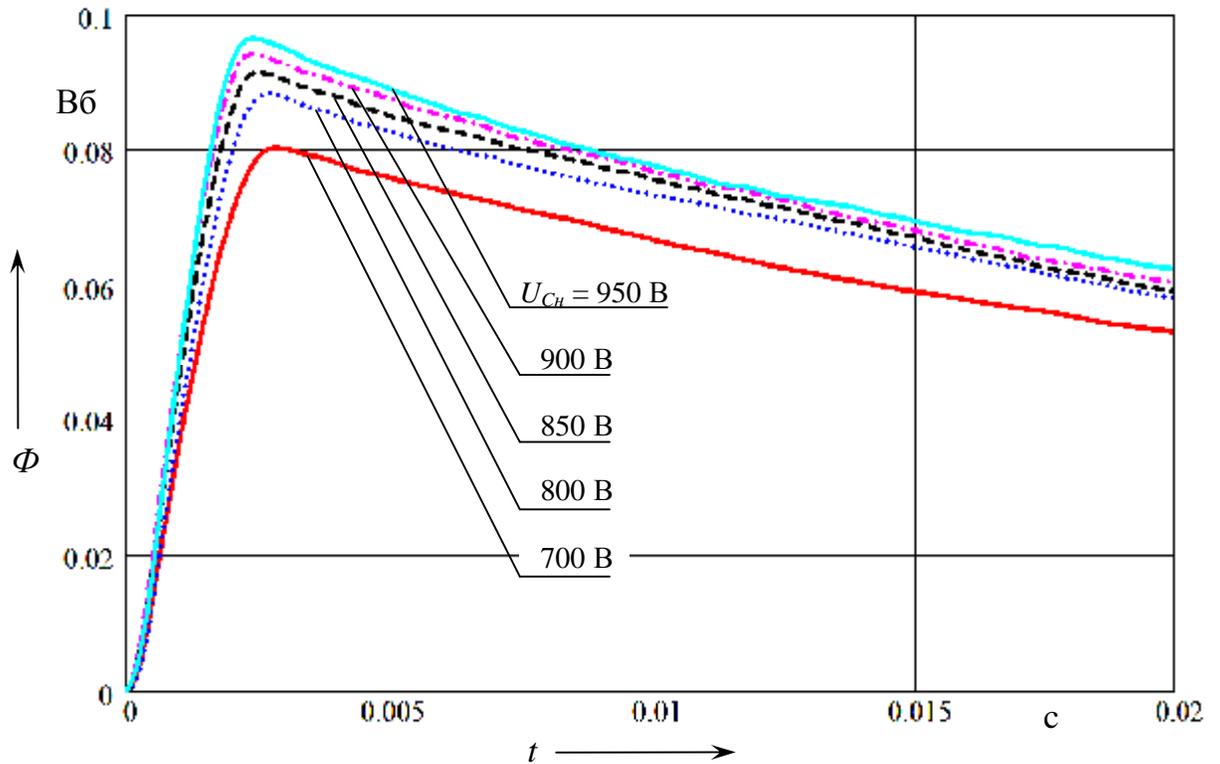


Рис. 4.8. Осциллограмма магнитного потока Φ полюса электромагнита для зазора 4,5 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

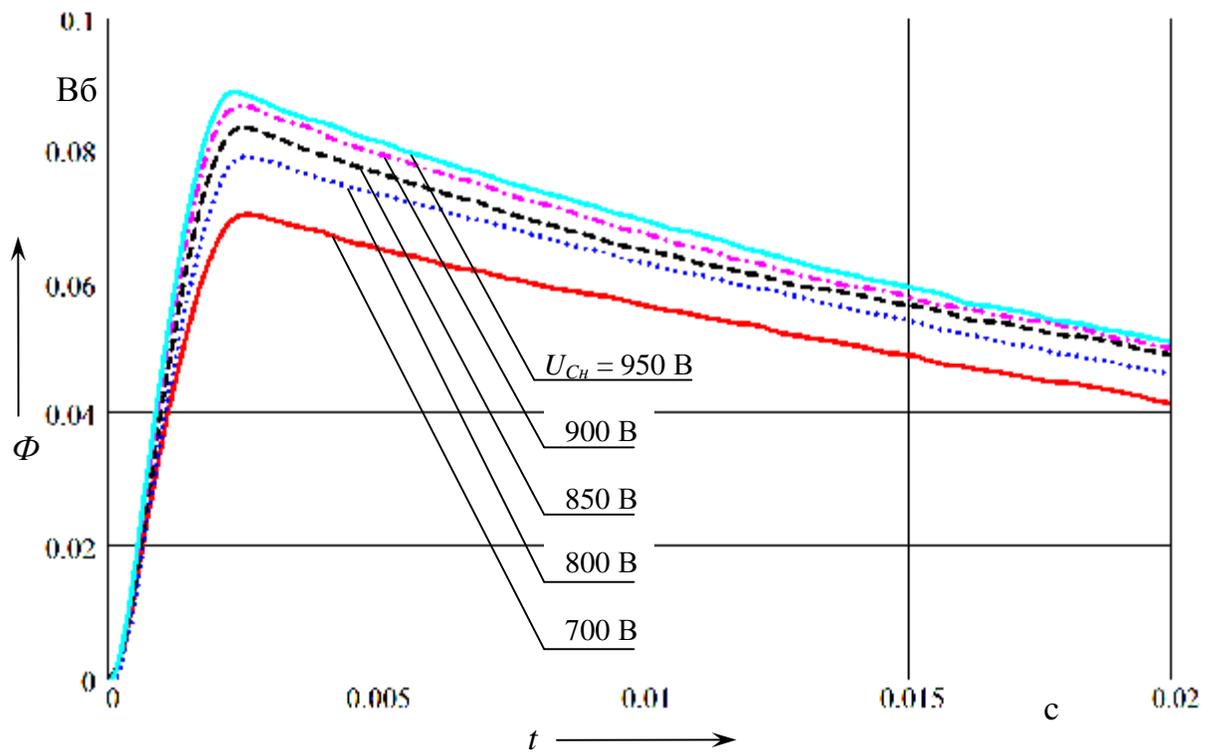


Рис. 4.9. Осциллограмма магнитного потока Φ полюса электромагнита для зазора 6 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

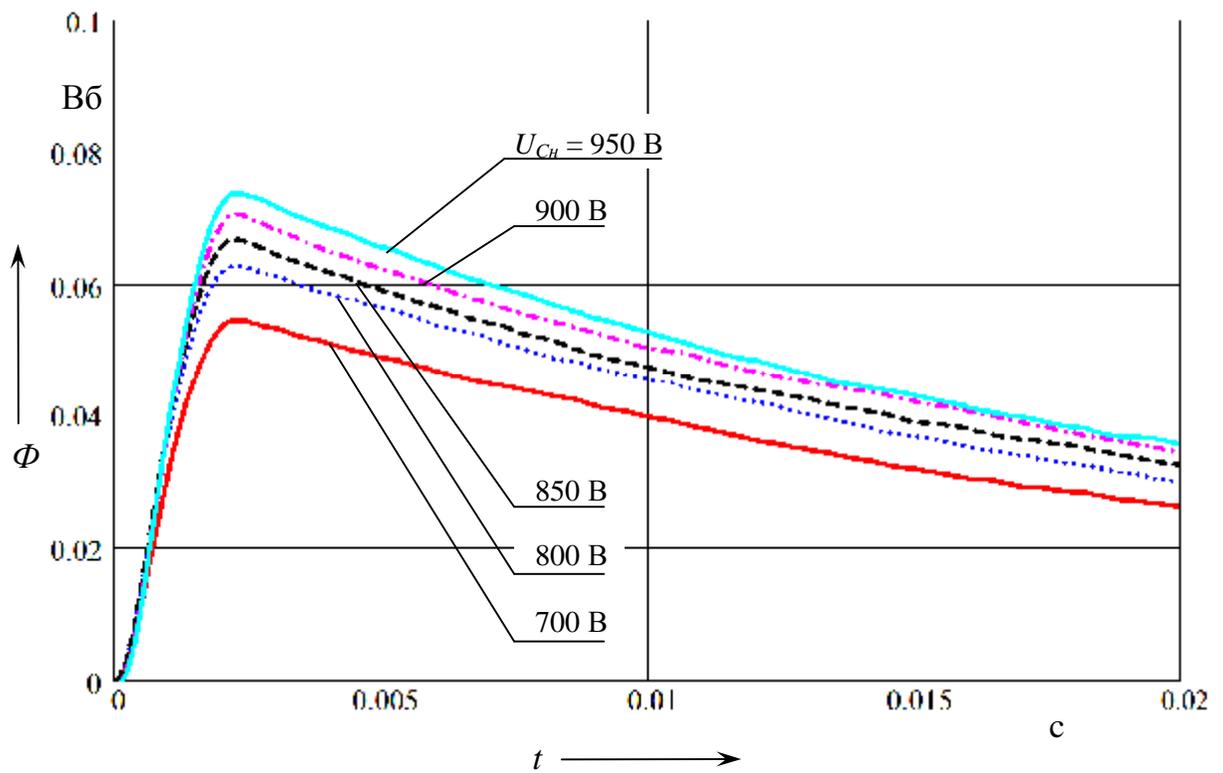


Рис. 4.10. Осциллограмма магнитного потока Φ полюса электромагнита для зазора 9 мм, при различных напряжениях в статическом режиме.

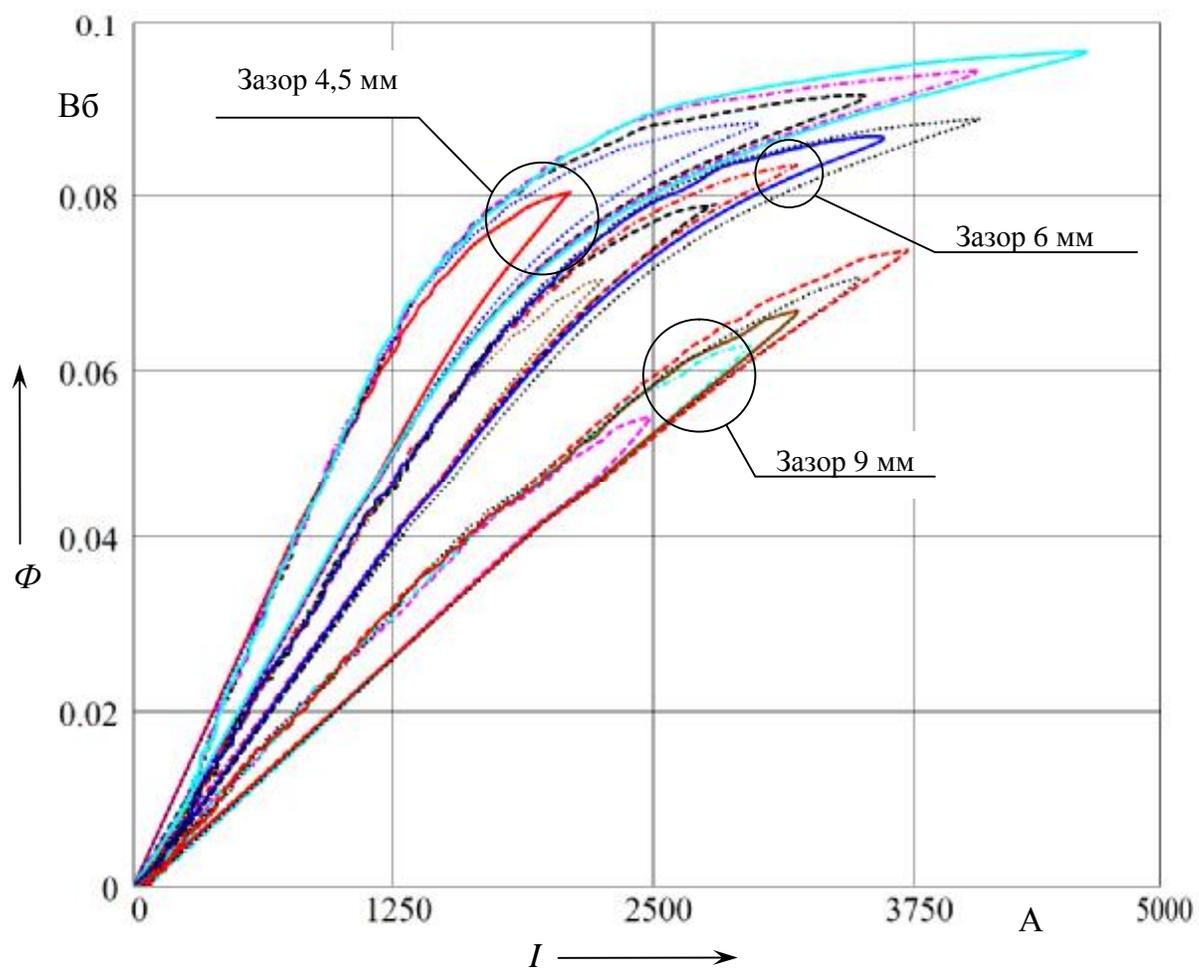


Рис. 4.11. Энергетические диаграммы $\Phi = f(I)$ в статическом режиме (режим заторможенного якоря), семейства для разных зазоров и при различных напряжениях.

Анализ экспериментальных данных.

1) ЭД (рис. 4.11) позволяют определить область значений напряжений и зазоров, при которых магнитная система электромагнита работает без насыщения. Работа с насыщением характеризуется снижением энергетических показателей, однако, до определённых пределов, позволяет получать значительный прирост абсолютных значений развиваемой силы.

На представленных диаграммах (рис. 4.11) насыщение магнитной системы проявляется в виде перегиба петли в сторону оси токов. Проявление насыщения монотонно усиливается с увеличением вводимой в зазор энергии (увеличением напряжения накопителя $U_{Cн}$) и с увеличением магнитной проводимости системы (уменьшением зазора в электромагните).

2) В статическом режиме энергетические диаграммы представляют собой начальные кривые намагничивания и при дополнении их ЭД, снятыми для тех же условий в динамике, станет возможным расчёт энергий на различных участках контура энергопреобразования и для различных участков времени энергопреобразования (см. п.п. 4.1.2, 4.1.3).

3). При неподвижном якоре уменьшение тока обмотки после его перехвата в контур с диодом (п.п. 2.2.2) происходит за счёт активного сопротивления упомянутого контура. В динамике величина этого активного сопротивления, в совокупности со степенью проявления эффекта вытеснения тока к поверхности проводника, определяют потери в обмотке.

Оценим активное сопротивление контура "диод-обмотка электромагнита". Функцию тока обмотки с момента его перехвата в контур "диод-обмотка" можно определить как [88]:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{r}{L}(t-t_0)}, \quad (4.6)$$

где I_0 – значение тока в момент его перехвата (т.е. фактически в момент начала процесса затухания), А; определяется по экспериментальным данным;

r – активное сопротивление контура, определяющее потери, Ом;

L – индуктивность обмотки, Гн; можно выразить с использованием формул (2.3) и (2.4):

$$L = \frac{1}{\left(\frac{P}{2 \cdot t_\phi}\right)^2 \cdot C}, \quad (4.7)$$

где t_ϕ – длительность фронта, определяемая по экспериментальным данным, с;

C – ёмкость конденсаторной батареи, Ф; в исследованной установке

$C = 5 \cdot 10^{-3}$ Ф.

t_0 – момент начала переходного процесса затухания, с.

Таким образом, получить значение r можно подбором. Для чего необходимо добиться максимального совпадения участка затухания снятой экспериментально осциллограммы тока и кривой, получающейся из расчётной функции (рис. 4.12).

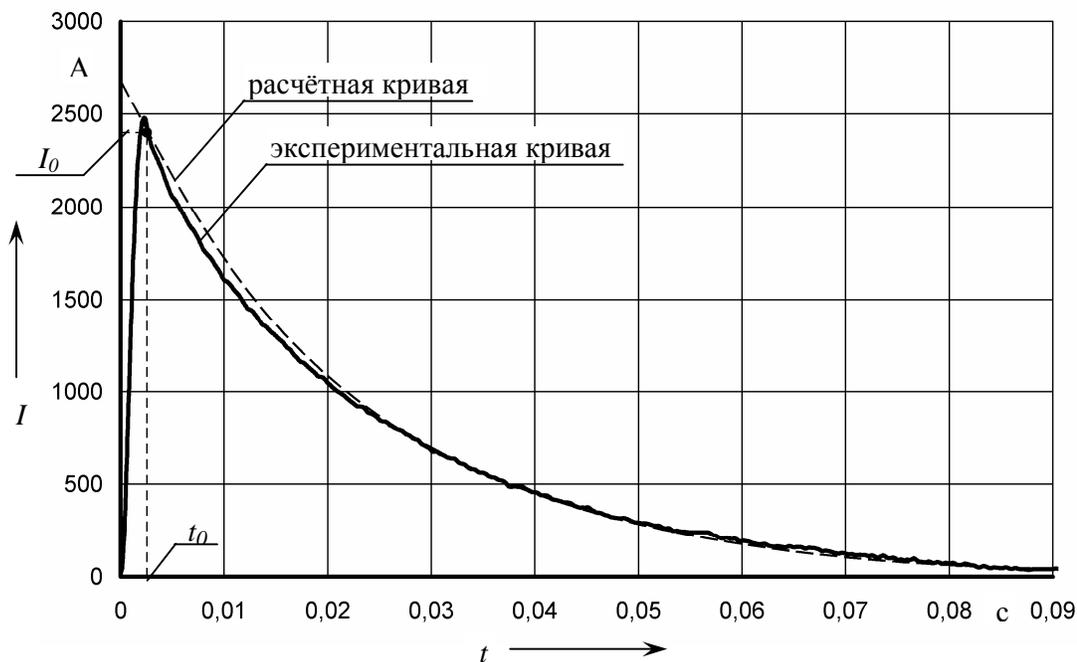


Рис. 4.12. К определению активного сопротивления контура "диод-обмотка" с использованием осциллограммы тока обмотки в статическом режиме.

Для уменьшения влияния насыщения магнитной системы и эффекта вытеснения тока в проводнике определение сопротивления r провели для максимального из выставившихся зазоров и минимального напряжения накопителя.

Итак, наилучшее совпадение экспериментальной и расчётной кривых, представленное на рис. 4.12, получено при значении активного сопротивления контура $r = 0,0183$ Ом.

5). Избыточность представленной в экспериментальных данных информации предполагает обнаружение возможностей её использования при развитии представлений о функционировании водного сейсмоисточника. Так, например, для наземных сейсмоисточников с электромагнитным приводом был разработан способ использования осциллограмм тока для контроля перемещения излучателя и определения степени согласованности работы на нагрузку [89].

4.1.2. Исследование режима давления.

Были получены данные для разных величин зазора в электромагните: 4, 5, 6, 7 мм.

Для снятия осциллограммы перемещения излучающей плиты на установке был смонтирован резистивный датчик (табл. 4.1, п.8). Один конец у

датчика был закреплён на основании, а второй конец датчика был соединён с излучающей плитой.

Исследование динамики в режиме давления в совокупности с режимом удара и с использованием данных из исследований при неподвижном якоре было сосредоточено на решении основного комплекса задач, упоминавшихся ранее (в начале п.п. 4.1). В частности, подлежали осуществлению и (или) определению:

- составляющие энергетического баланса, его особенности и значимые факторы;
- количественные характеристики динамических процессов, а также связь последних с видом экспериментально определяемых кривых;
- сравнительный анализ динамики при различных режимах работы электромеханической системы (т.е. при различных сочетаниях значений зазора в электромагните и между ударником и излучателем);
- рекомендации к полевым испытаниям и совершенствованию водного сейсмоисточника.

Полученные данные.

Были получены временные осциллограммы тока I обмотки и потока Φ полюса электромагнита – рис. 4.13, 4.14 (а – г), а также ЭД (зависимость потока от тока $\Phi(I)$) – рис. 4.15 (а – г).

На рис. 4.16 представлена осциллограмма отклика сейсмоприёмника. Так как в данной осциллограмме представляет интерес только амплитудное значение (сигнала сейсмоприёмника), а вся кривая необходима лишь для контроля достоверности результатов оценки сейсмоздействия (по неизменности формы сигнала сейсмоприёмника), то для различных условий (напряжений и зазоров) эти осциллограммы не приводятся. Однако позже, на рис. 4.32, представлена зависимость амплитуды сигнала отклика сейсмоприёмника от режимов работы.

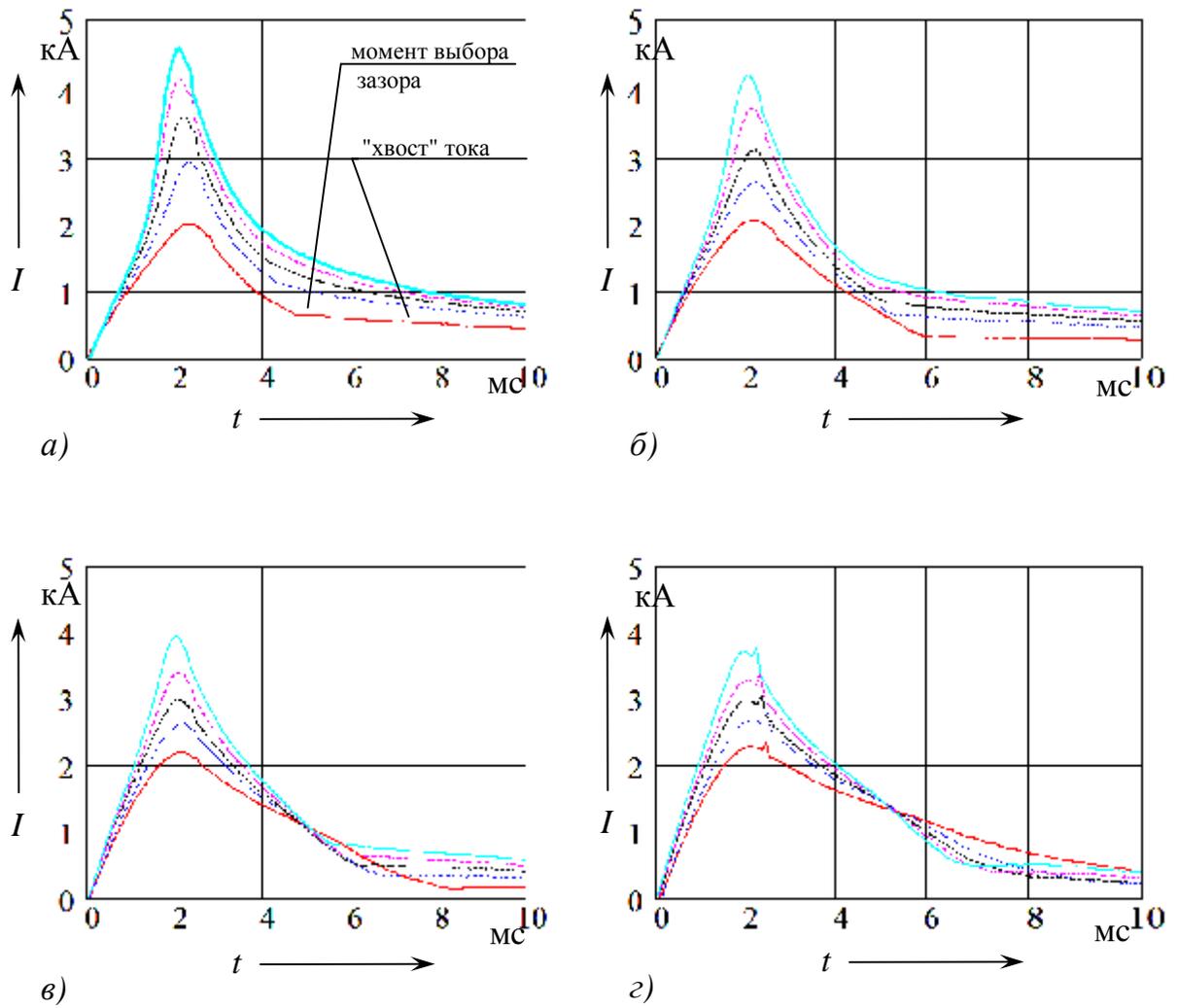


Рис. 4.13. Осциллограммы тока I обмотки при напряжениях 700, 800, 850, 900 и 950 В, соответствующих кривым тока по возрастанию амплитуды, в режиме давления;
 а) при зазоре 4 мм;
 б) при зазоре 5 мм;
 в) при зазоре 6 мм;
 г) при зазоре 7 мм.

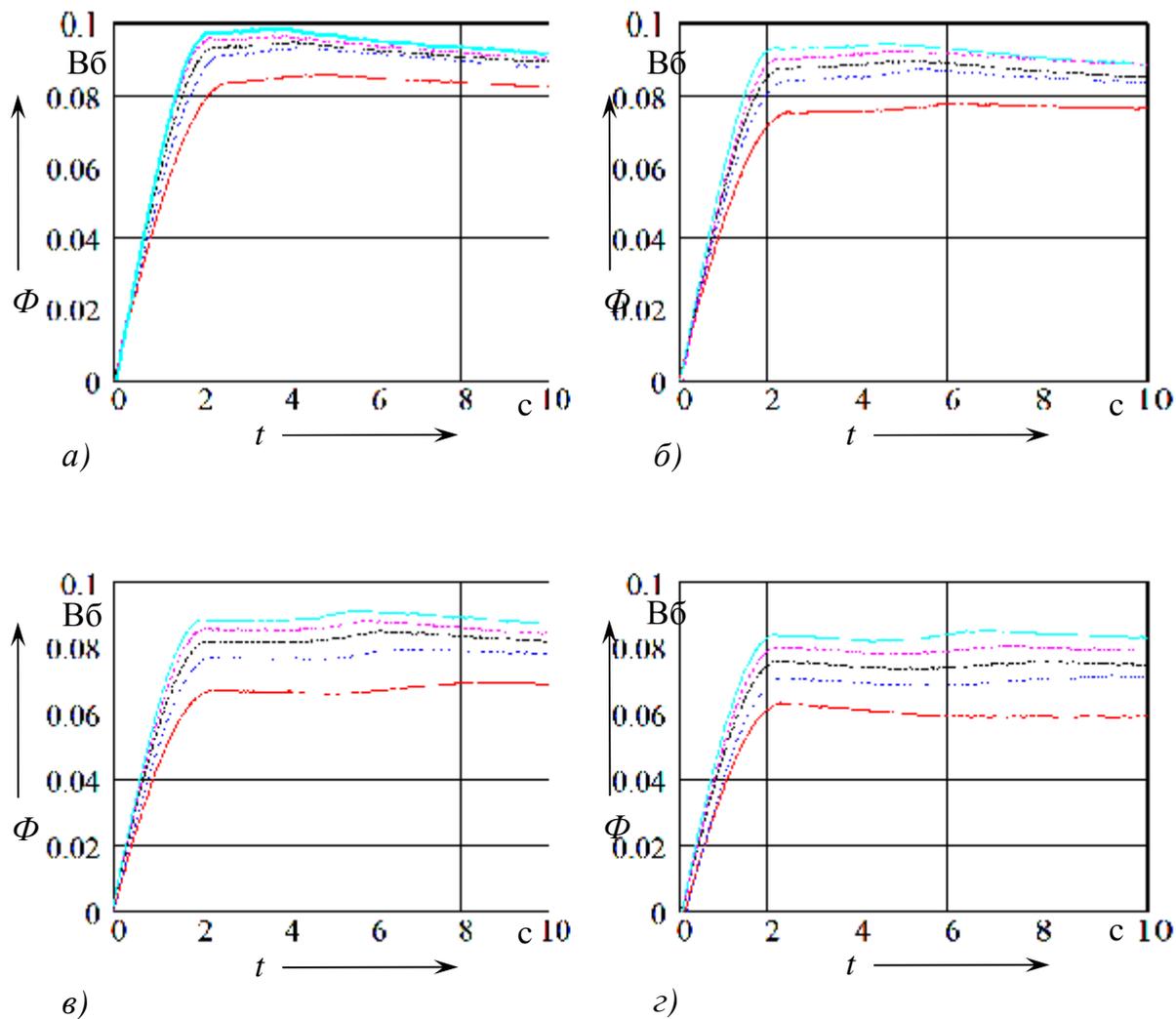


Рис. 4.14. Осциллограммы магнитного потока Φ обмотки при напряжениях 700, 800, 850, 900 и 950 В, соответствующих кривым потока по возрастанию амплитуды, в режиме давления;

- а) при зазоре 4 мм;
- б) при зазоре 5 мм;
- в) при зазоре 6 мм;
- г) при зазоре 7 мм.

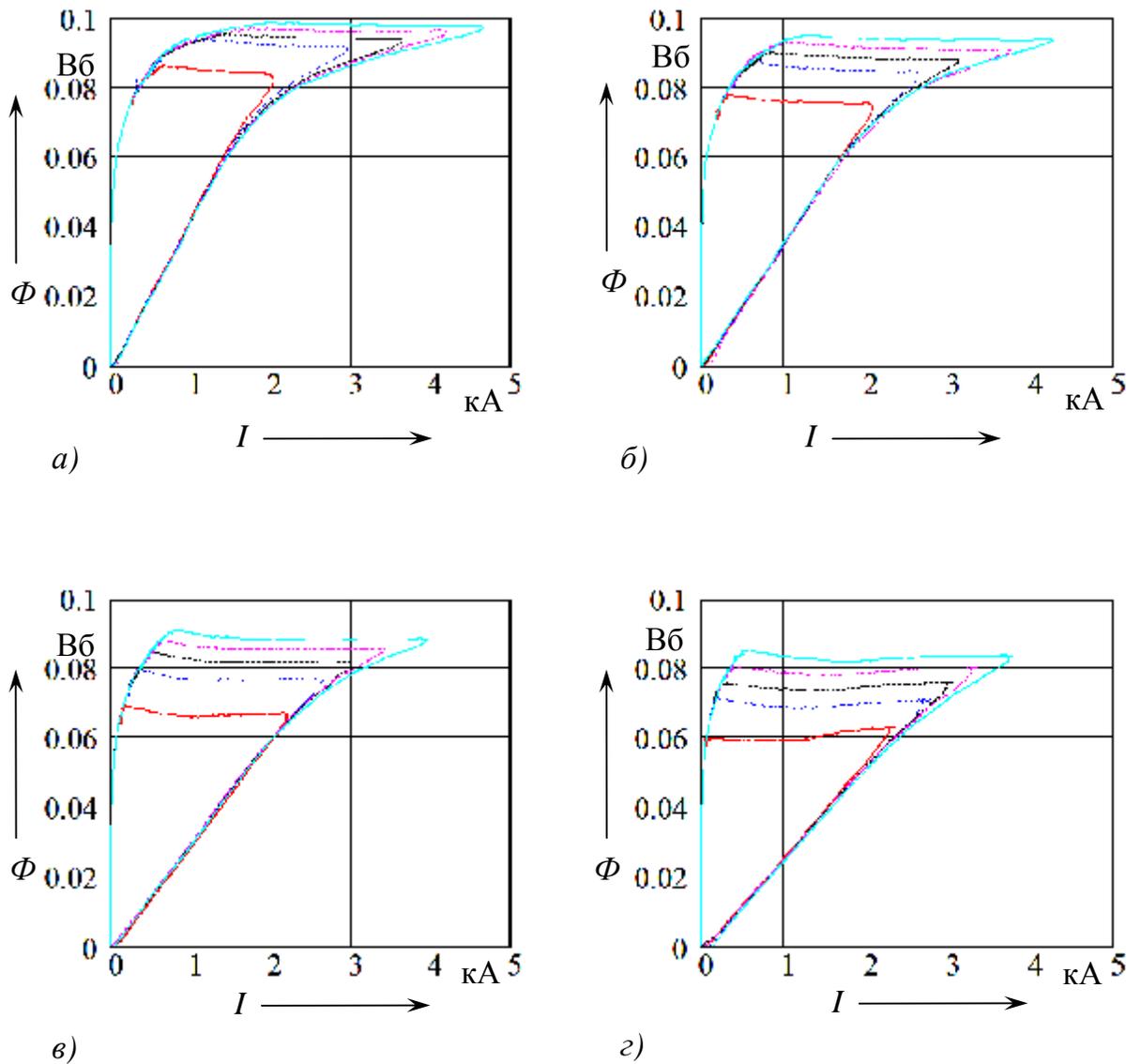


Рис. 4.15. Энергетические диаграммы $\Phi = f(I)$ при напряжениях 700, 800, 850, 900 и 950 В, соответствующих кривым по возрастанию охватываемой площади, в режиме давления;

- а) при зазоре 4 мм;
- б) при зазоре 5 мм;
- в) при зазоре 6 мм;
- г) при зазоре 7 мм.

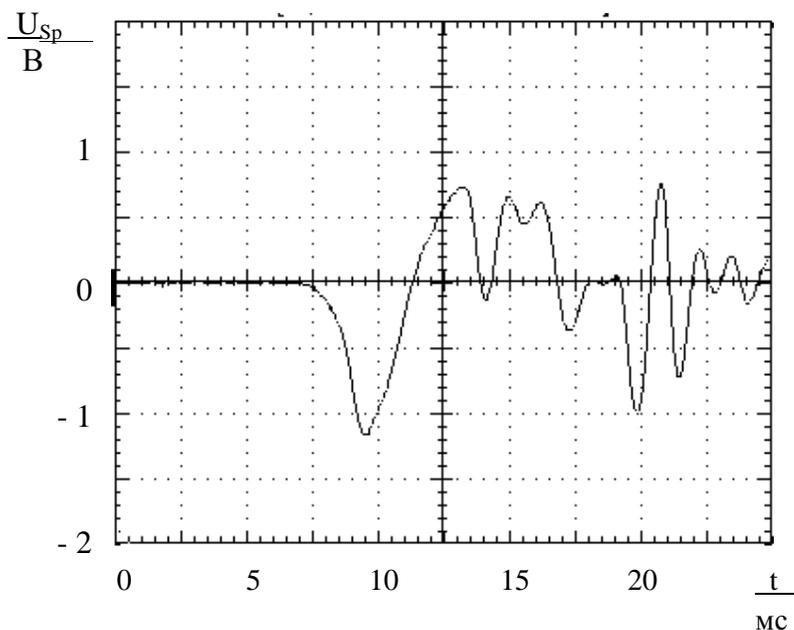


Рис. 4.16. Осциллограмма отклика сейсмоприёмника (зазор 5 мм, $U_{Сн} = 950 В$)

Анализ экспериментальных данных.

1) По рис. 4.15. определили напряжение, при котором начинается насыщение магнитной системы для различных зазоров:

Таблица 4.3.

Граница перед переходом магнитной системы привода в область насыщения

Параметр	Зазор в электромагните d_l , мм			
	4	5	6	7
Напряжение емкостного накопителя $U_{Сн}$, В	700	800	850	950
Энергия емкостного накопителя W_C , Дж	1225	1600	1806,25	2256,25

Эта информация может иметь несколько применений: во-первых, она определяет область работы электромагнитного привода, в которой не происходит снижение КПД за счёт насыщения магнитной системы. Что иногда может быть особенно важным, например – для установок с частым срабатыванием электромагнитного привода, либо с критичными массогабаритными показателями. При этом возможность *энергетической* оптимизации (с учётом влияния насыщения на КПД), может ограничиваться требованием наилучшего выполнения установкой определённой *функции*. Так, для водного сейсмоисточника особо важным является создание сейсмического сигнала с максимальной амплитудой в ограниченной частотной области. Поэтому здесь возникает задача оптимизации как с учётом *требования максимального КПД*, свойственного электрическим машинам, так и с учётом *требования выполнения функции* (излучения), свойственного электрическим аппаратам.

2) При максимальном значении начального зазора (7 мм), ток в момент выбора зазора имеет меньшее значение, чем на других, меньших зазорах при одинаковых напряжениях $U_{Сн}$ (рис. 4.13). Это значит, что меньше энергии теряется на протекание тока через контур "обмотка электромагнита – диод" после выбора зазора (на "хвост" тока). Так как площадь, ограниченная "хвостом" тока и осью времени, пропорциональная этим потерям, меньше при большем зазоре.

3) Момент выбора зазора, определяющийся по излому кривой тока (рис. 4.13) при переходе на последний его участок ("хвост"), происходит раньше при вводе большей энергии из накопителя (при большем $U_{Сн}$). Большая сила обеспечивает меньшее время выбора зазора (рис. 4.17). Меньший зазор также выбирается быстрее.

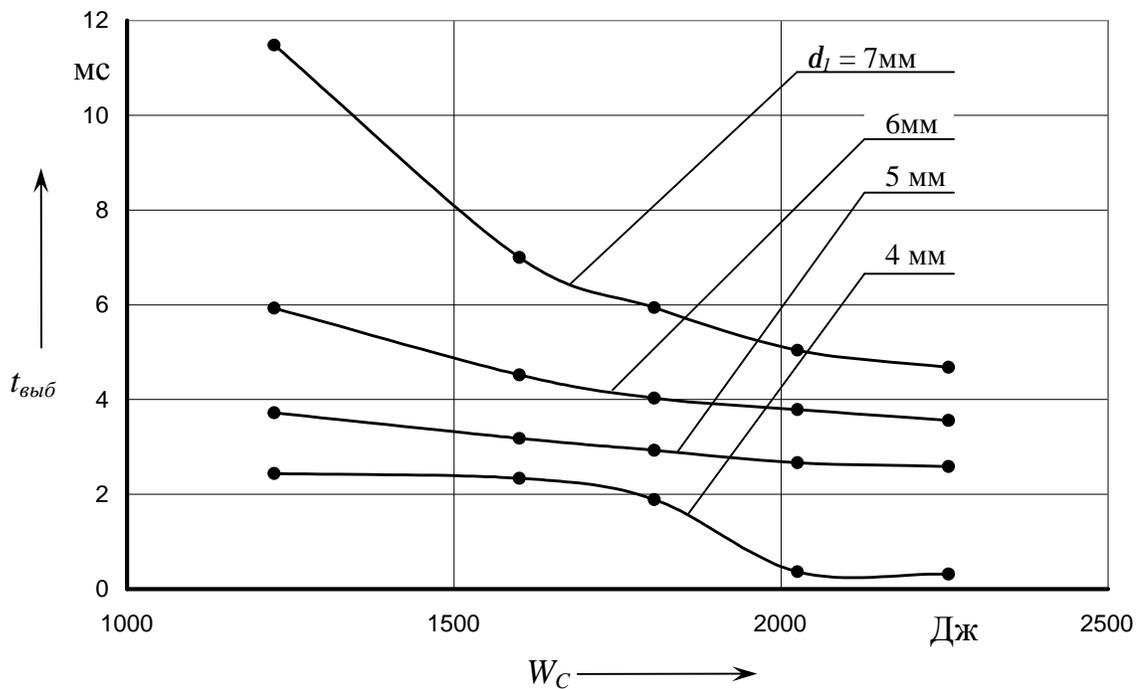


Рис. 4.17. Зависимость времени выбора зазора от энергии емкостного накопителя при различном начальном зазоре.

4) На большинстве осциллограмм потока Φ снятых в динамических режимах (рис. 4.14) после достижения максимального значения просматривается участок спада с последующим ростом. Причём этот рост происходит даже до большего значения, чем предыдущий максимум, обусловленный вводом энергии из накопителя. Этот прогиб осциллограммы потока объясняется следующим: после завершения ввода энергии в обмотку из накопителя (после первого максимума) поток начинает падать вследствие потерь энергии на активных сопротивлениях обмотки и диода, однако при уменьшении зазора часть потока, которая ранее больше проходила вне магнитопровода (т.н. потоки рассеяния, выпучивания) начинает переходить в магнитопровод и проходить через измерительный виток, внося свою добавку.

Таким образом, когда этот фактор возврата потока в магнитопровод становится более значительным, чем потери на активном сопротивлении на осциллограмме наблюдается рост потока. После выбора зазора на величине потока сказывается только потери, и он практически линейно падает.

5) В режиме давления зафиксированы следующие максимумы измеряемых величин (при $U_{Cн} = 950$ В):

- ток обмотки электромагнита $I_m = 4,6$ кА (зазор в электромагните 4 мм);
- поток полюса $\Phi_m = 100$ мВб (зазор в электромагните 4 мм);
- сигнал отклика сейсмоприёмника $U_{Sp} = 1,075$ В (зазор в электромагните 5 мм);
- смещение излучающей плиты относительно основания $X_{i-o} = 3$ мм (зазор в электромагните 5 мм).

6) Интервал изменения величины смещения излучающей плиты для всех условий невелик: от 2,2 мм до 3 мм, однако при этом амплитуда отклика сейсмоприёмника существенно изменяется. Это объясняется в частности тем, что изменяется не только величина перемещения излучающей плиты, но и скорость, с которой она перемещается.

7) Интервал от момента начала процессов в системе (начала ввода энергии в обмотку) до выбора зазора изменяется в пределах от 4 до 11,5 мс. Момент максимума тока стабилен и составляет около 2 мс от начала разряда.

8) Насыщение материала магнитопровода приводит к уменьшению его магнитной *проницаемости*, магнитная *проводимость* магнитопровода уменьшается, на магнитной проводимости магнитопровода начинает увеличиваться падение намагничивающей силы, а соответственно резче возрастает ток. Процесс насыщения магнитопровода проявляется на осциллограммах рис. 4.13 в виде увеличения скорости нарастания тока на фронте (вогнутости фронта). На меньших зазорах (например, сравните рис. 4.13 *г* и рис. 4.13 *а*) это проявляется сильнее вследствие более быстрого насыщения магнитной системы с меньшим зазором.

9) Анализ энергетического баланса в электромеханической системе сейсмоисточника и влияния на него различных параметров системы и режимов работы проведены по методике предложенной в п.п. 2.2.4. Согласно упомянутой методике для определения составляющих энергетического баланса провели следующие предварительные действия:

- расчёт коэффициента для учёта полного потока (потокосцепления). В связи с тем, что для измерения магнитного потока использовался *один* измерительный виток на *одном* полюсе индуктора коэффициент для полного потока определился как

$$k_{\gamma} = N \cdot p = 12 \cdot 2 = 24, \quad (4.8)$$

где N – количество витков обмотки индуктора на полюсе;

p – количество полюсов индуктора;

- расчёт площадей ЭД, полученных в статическом режиме и режиме давления. С учётом большого количества точек в каждой из экспериментальных кривых (около 2500), расчёт проводился по формуле приближённого интегрирования – формуле прямоугольников [90, с. 138], которая использовалась в виде:

$$s_{i+1} = s_i + \frac{i_{i+1} + i_i}{2} \cdot (f_{i+1} - f_i) \quad (4.9)$$

где s_{i+1} – очередное значение элементарного слагаемого общей площади;
 s_i – текущее, известное значение элементарного слагаемого общей площади;

i_{i+1} – очередное значение тока (уменьшенного в 2 раза, т.к. рассматривается половина электромагнита);

i_i – текущее значение тока;
 f_{i+1} – очередное значение потока;
 f_i – текущее значение потока.

- определение значений площадей статических магнитных циклов, для значений зазоров, аналогичных значениям зазоров в динамическом режиме. Проводилось по графику, приведённому на рис. 4.18, на котором изображены кривые, отражающие изменение площади статических магнитных циклов при изменении зазора для различных энергий конденсаторного накопителя.

На рис. 4.19 – 4.21 приведены составляющие энергетического баланса:

механическая энергия, относительные потери в стали магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов (отнесённые к энергии конденсаторной батареи), относительные потери в обмотке возбуждения (также отнесённые к энергии конденсаторной батареи), соответственно. На рис. 4.22 даны зависимости КПД электромеханического преобразования, а на рис. 4.23 показана

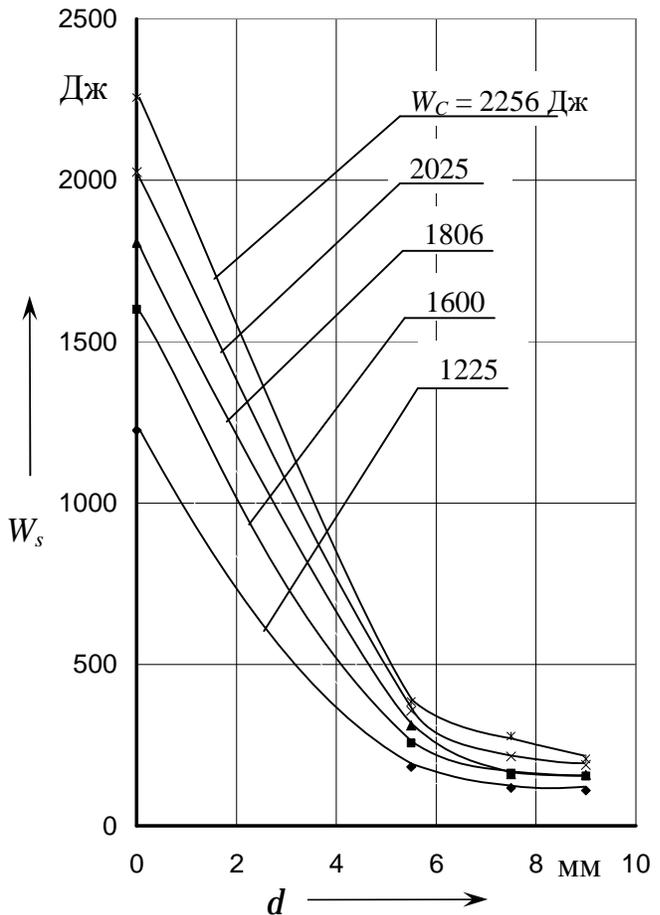


Рис. 4.18. Энергия, определяемая площадью энергетических диаграмм в статике.

взаимозначимость составляющих энергетического баланса для двух значений зазора в электромагните.

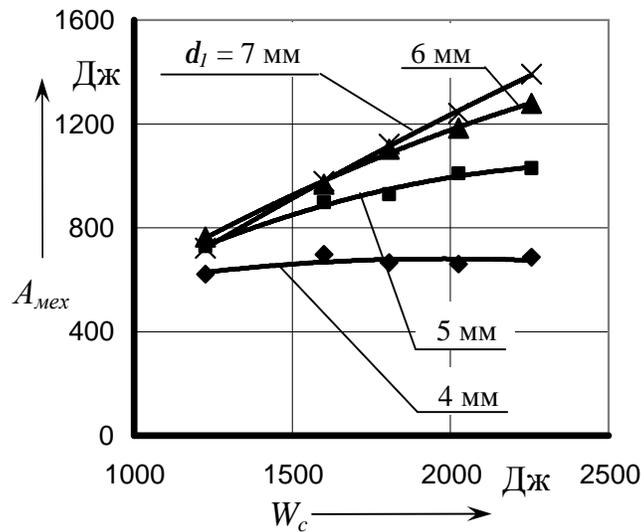


Рис. 4.19. Механическая энергия.

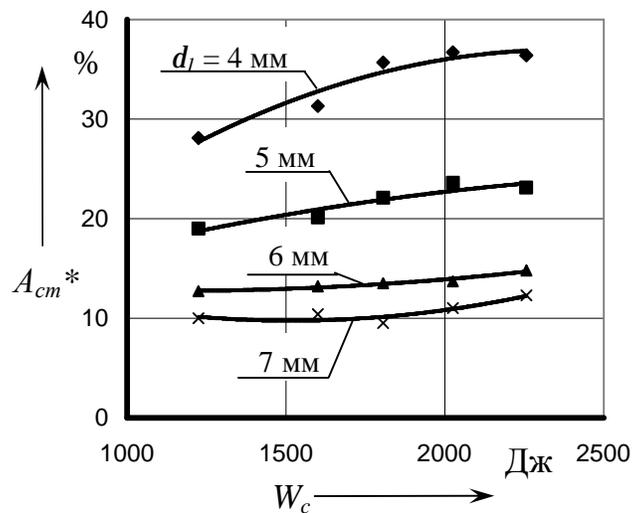


Рис. 4.20. Относительные потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи.

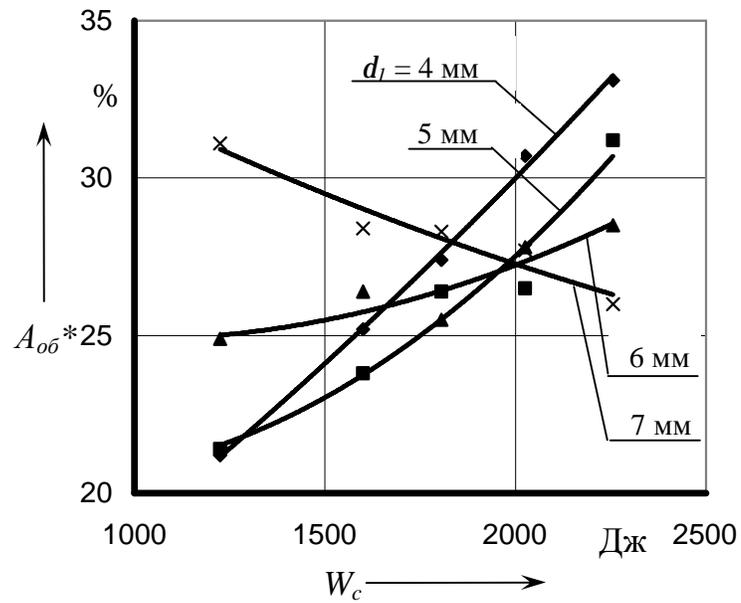


Рис. 4.21. Относительные потери в обмотке возбуждения.

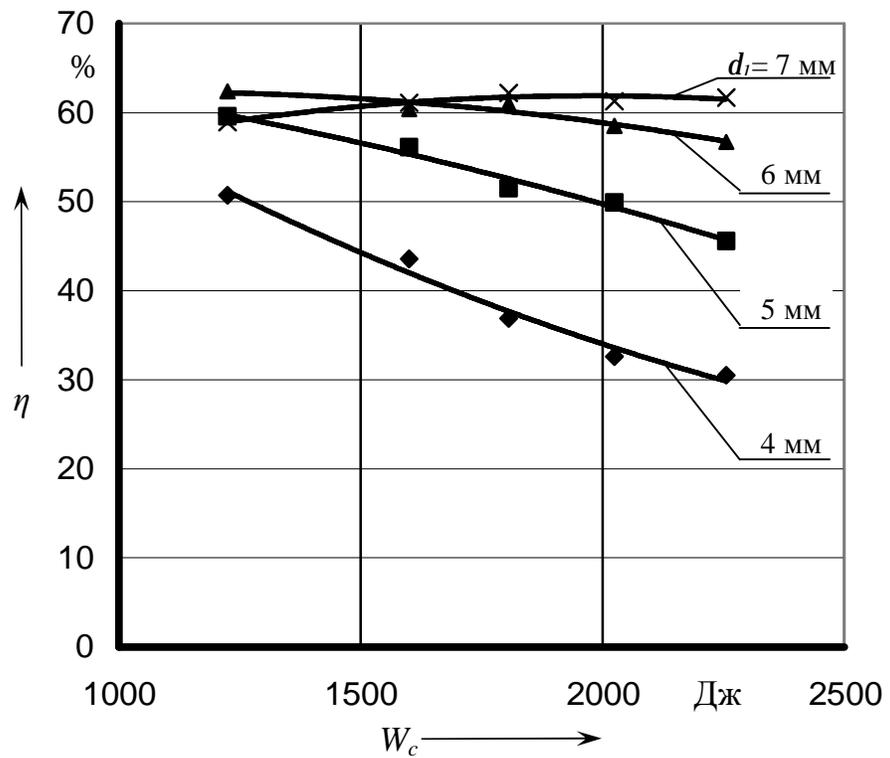
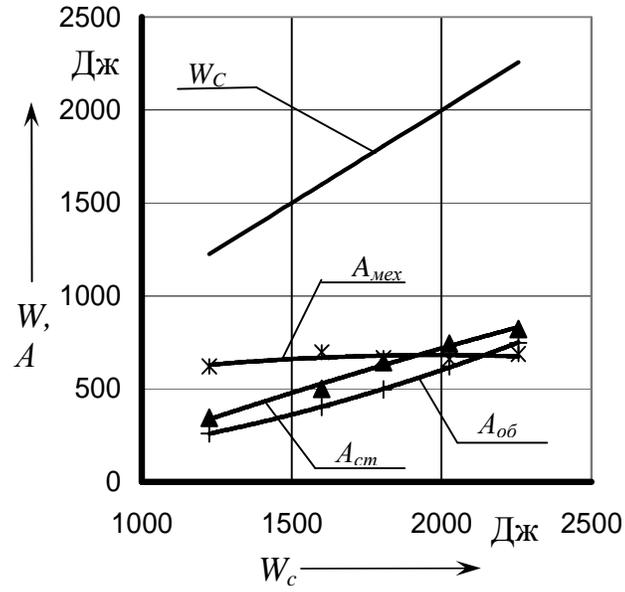
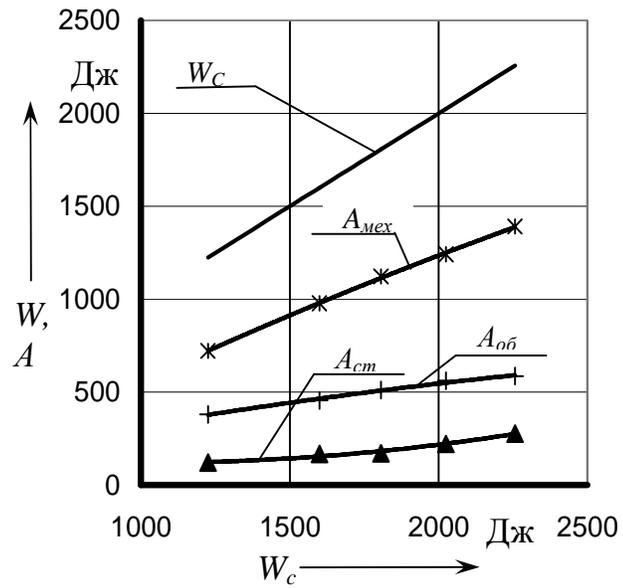


Рис. 4.22. КПД электромеханического преобразования.



а)



б)

Рис. 4.23. Составляющие энергетического баланса:
а – для зазора $d_1 = 4$ мм, б – для зазора $d_1 = 7$ мм.

По рис. 4.19 – 4.23 можно сделать следующий ряд замечаний и выводов.

- Потери в стали (A_{cm}^*) могут составлять от примерно 10 до 40 %. При этом, с уменьшением зазора d_l на равные величины, потери изменяются нелинейно (шаг имеет переменное значение: ~ 3,2; 8,5; 13 %).

Рост потерь с уменьшением зазора обуславливается, во-первых, увеличением скорости нарастания потока (что видно из рис. 4.14), и, во-вторых, более ранним насыщением материала магнитопровода (на рис. 4.15 зрительно хорошо просматривается "скрадывание", с уменьшением зазора, площади ЭД на нижнем участке (от нулевых до максимальных значений тока и потока)).

Основной временной интервал проявления потерь на гистерезис и вихревые токи – это фронт импульса тока, что следует из физического объяснения происхождения указанных потерь.

- Скорость изменения потерь в стали (A_{cm}^*) от степени форсировки (от величины начальной энергии конденсаторной батареи W_C) в исследуемом, рабочем интервале значений форсировки, также возрастает, однако на заметно меньшие значения, чем при изменении зазора.¹ Так, шаг принимает значения: 2; 2; 4,6; 9 %.

- Потери в обмотке возбуждения ($A_{об}^*$) в зависимости от параметров составляют 20-35% энергии накопителя и равно определяются как степенью форсировки, так и величиной рабочего зазора. Так как индуктивность электромагнита значительно изменяется в связи с полным выбором рабочего зазора, то это обуславливает длительное затухание тока, в сотню раз превышающее длительность эффективного энергопреобразования. Это приводит к тому, что основные потери в обмотке возбуждения выделяются после эффективного энергопреобразования и их величина зависит от амплитуды остаточного тока и длительности его затухания.

- Абсолютные значения потерь в обмотке ($A_{об}$) с увеличением форсировки возрастают для всех зазоров. Однако если рассматривать относительные значения, то поведение кривых полученных для разных зазоров с ростом форсировки меняется. Их подъём с увеличением зазора уменьшается, а при значении зазора 7 мм, вообще, наблюдается уменьшение потерь на всём диапазоне начальных энергий накопителя.

- И в абсолютных, и в относительных значениях, с ростом начальной энергии накопителя W_C меняется порядок следования кривых для разных зазоров относительно шкалы $A_{об}$. И, если на малых

¹ Если рассматривать больший диапазон изменения начальных значений энергии конденсаторной батареи, то нелинейность роста потерь от степени форсировки будет выше [60].

значениях W_C кривые для большего зазора располагаются выше, то при больших значениях W_C они ниже.

- Из последних двух замечаний следует, что то, насколько будут велики потери в обмотке, зависит от эффективности потребления энергии на участке от, примерно (см. п.п. 2.2.2), максимума тока до выбора зазора в электромагните. Поэтому, при малой энергии W_C , кривые соответствующие большим зазорам расположены выше, так как недостаточно энергии для их выбора, а при большой энергии W_C выше расположены кривые малых зазоров, так как система за малое время их выбора не успевает потребить энергию магнитного поля в механическую.
- Как видно из рис. 4.19, в целом, увеличение энергии накопителя в исследованном диапазоне приводит к увеличению потреблённой механической энергии. При этом, за счёт выигрешности больших зазоров обусловленной меньшими потерями, рост механической энергии для максимального зазора существенно выше, чем для минимального.
- Рис. 4.22 резюмирует вышеприведённые рис. 4.19 – 4.21 и замечания по ним. Из него следует вывод, что энергетический баланс, как один из аспектов проектирования, представляет желательным работу электромеханической установки в режиме давления организовывать на больших зазорах при больших напряжениях.
Конечно же, требования безопасности и, в частности классификация электроустановок по классам опасности накладывает ограничения на увеличения напряжения. Требования наилучшего выполнения функции – воздействия на среду, в совокупности с требованиями к массогабаритным и экономическим показателям ограничивают увеличение емкости накопителя, влекущее ограничение по минимально допустимой развиваемой силе².
- Одной из возможностей повышения КПД электромеханической системы может быть использование в схеме питания рекуперативного режима. Таким образом удастся снизить основные потери – потери в обмотке $A_{об}$, за счёт возврата энергии, остающейся в обмотке после выбора зазора в емкостной накопитель.

² Которая снижается с ростом зазора при прочих равных условиях (см. рис. 4.4).

4.1.3. Исследование ударного режима.

Задачи, подлежащие решению при исследовании ударного режима являются общими для динамических режимов и приведены ранее, в п.п. 4.1.2.

В данном режиме на различных величинах зазора выбега ударника ("механического" зазора) были сняты осциллограммы, аналогично режиму давления. Однако разным "механическим" зазорам соответствуют разные интервалы задаваемых значений зазора электромагнита. Это связано со следующими соображениями:

1) снизу интервал величин зазора в электромагните ограничен значениями, близкими к величине данного механического зазора, так как необходимо, чтобы ударник начал взаимодействовать с излучающей плитой до выбора зазора в двигателе. В противном случае это взаимодействие начнётся уже без работы двигателя на ударник, и будет определяться только запасённой ударником (без якоря) кинетической энергией, что снизит эффективность воздействия.

2) сверху интервал величин магнитного зазора ограничен значениями, определяющимися областью применимости используемого двигателя. Т.е. электромагнит является короткоходовым, а значит на больших величинах зазора (рабочего хода) существенно падает развиваемая им сила. Увеличение силы возможно в данном случае только лишь за счёт увеличения энергии батареи накопительных конденсаторов.

Для снятия осциллограмм перемещений на установке были смонтированы два резистивных датчика (табл. 4.1, п.8). Один конец у обоих датчиков был закреплён на основании, а второй конец у одного датчика был соединён с излучающей плитой, а у другого – с ударником.

Полученные данные.

В режиме удара были получены осциллограммы для тех же величин, которые измерялись в режиме давления (перемещения, ток обмотки, поток полюса, энергетическая диаграмма, сигнал сейсмоприёмника). Но при этом, помимо измерений для разных начальных энергий емкостного накопителя и для разных зазоров в электромагните, исследовалось влияние величины разбега ударника. Следствием чего явилось четырёхкратное увеличение количества снятых осциллограмм. Сочтено возможным не приводить все снятые кривые, т.к. многие замечания для них аналогичны замечаниям, приведённым в п.п. 4.1.2 для режима давления, а отличное отмечено ниже.

Анализ экспериментальных данных.

1) Аналогично п.п. 4.1.2, определили примерную границу перехода магнитной системы привода в область насыщения:

Таблица 4.4.

Примерная граница перед переходом магнитной системы привода в область насыщения

Зазоры (разбег d_2 /в электромагните d_1), мм		Параметр	
		Напряжение емкостного накопителя $U_{Cн}$, В	Энергия емкостного накопителя W_C , Дж
3	6	850	1806,25
	8	граница не достигнута (-)	-
	10	-	-
	12	-	-
4	5	800	1600
	6	850	1806,25
	7	-	-
	8	-	-
5	6	950	2256,25
	7	-	-
	8	-	-
	9	-	-
6,5	7,5	-	-
	8,5	-	-
8,5	9,5	-	-
	10,5	-	-

Как видно из таблицы 4.4 – переход от режима давления к ударным режимам приводит к снижению проявления насыщения магнитной системы, что должно способствовать повышению КПД электромеханического преобразования.

2) Магнитная энергия из зазора в режиме удара в большинстве случаев забирается в механическую лучше, чем в режиме давления. Это объясняется тем, что якорь, имеет часть хода без связи с нагрузкой и энергия начинает потребляться механической системой раньше и интенсивнее. Описанное видно из сравнения "хвостов" токов на рис. 4.13 и рис. 4.24.

3) На рис. 4.25 а–г представлена зависимость времени выбора зазора от начальной энергии конденсаторного накопителя при различных комбинациях значений зазоров (разбега и зазора в электромагните).

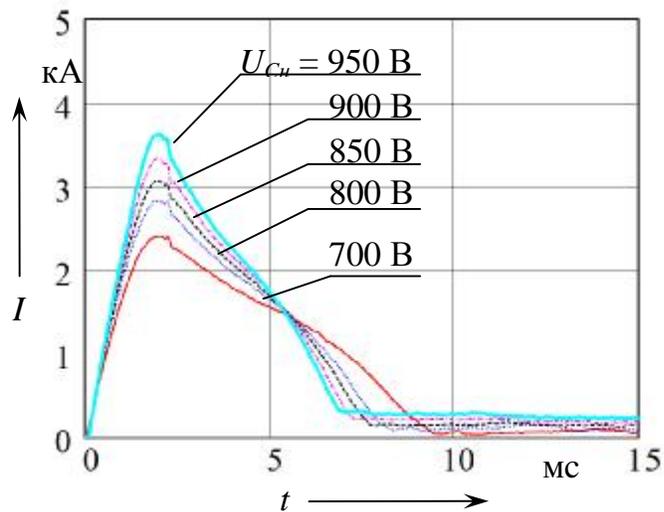


Рис. 4.24. Ток обмотки электромагнита в режиме удара при зазоре в электромагните 5 мм, разбеге 8 мм, для разных значений начального напряжения накопителя (и соответствующей ему энергии).

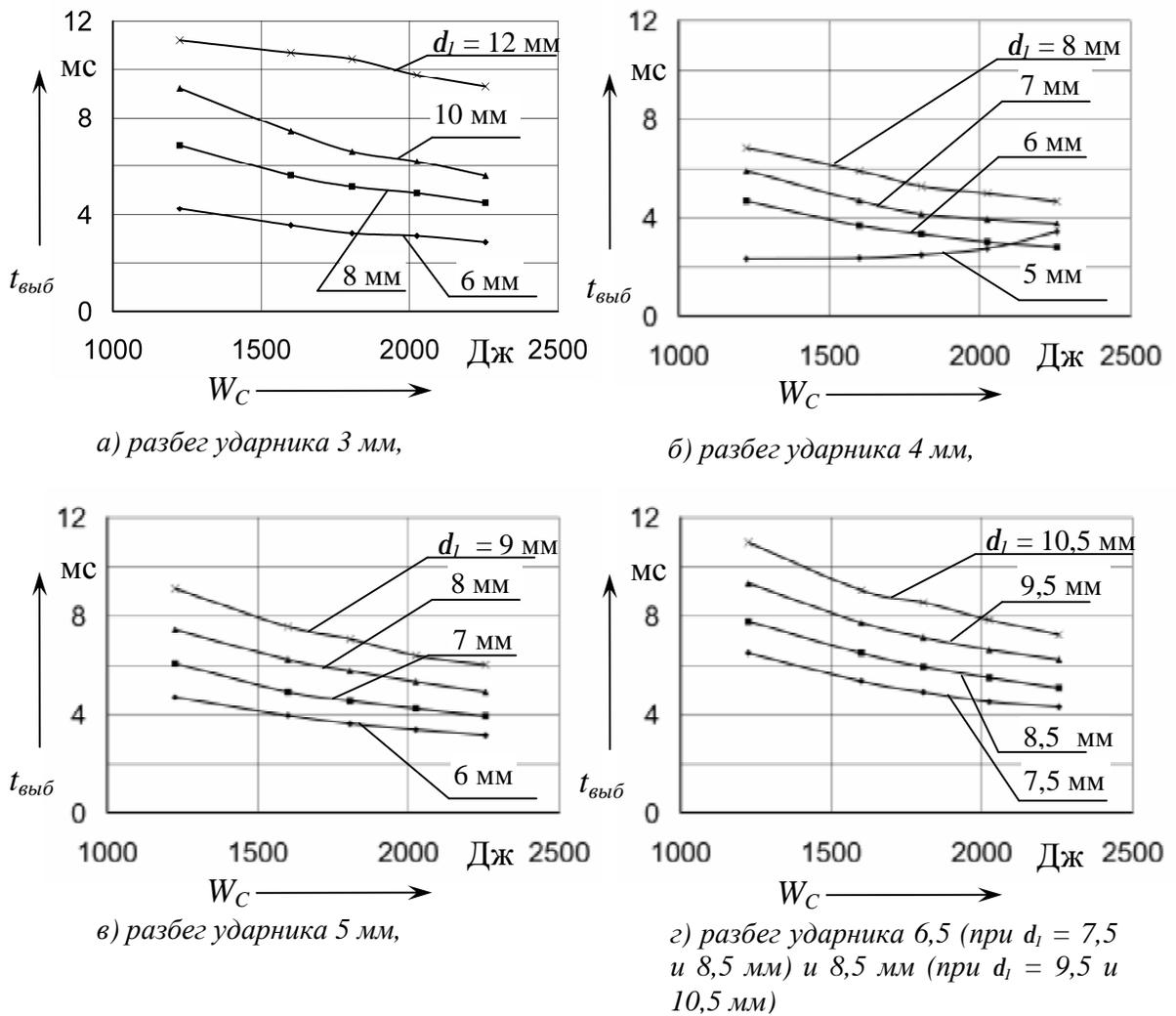


Рис. 4.25. Зависимость времени выбора зазора от энергии емкостного накопителя при различных комбинациях величины разбега ударника и зазора в электромагните.

Из сравнения рис. 4.25 а–г и рис. 4.17 можно отметить следующее:

- одинаковый зазор в электромагните выбирается быстрее (в 1,2 – 1,5 раза) в режиме удара за счёт наличия свободного хода якоря (до встречи ударника с излучателем). Однако требование превышения величины зазора в электромагните над разбегом ударника приводит к необходимости работы на больших, при прочих равных условиях, зазорах d_I ;

- очевидна тенденция увеличения времени выбора зазора при переходе к большему разбегу ударника и при снижении начальной энергии конденсаторного накопителя. В дальнейшем эта информация может позволить установить взаимосвязь между параметрами сейсмоисточника, при которых формировался сейсмический сигнал и характеристиками этого сигнала.

4) Зафиксированы следующие максимальные значения величин (при $U_{Cн} = 950$ В):

- ток обмотки электромагнита $I_m = 4,34$ кА (разбег ударника 4 мм, зазор в электромагните 5 мм);

- поток полюса $\Phi_m = 96,5$ мВб (разбег ударника 4 мм, зазор в электромагните 5 мм);

- сигнал отклика сеймоприёмника $U_{Sp} = 1,7$ В (разбег ударника 3 мм, зазор в электромагните 8 мм);

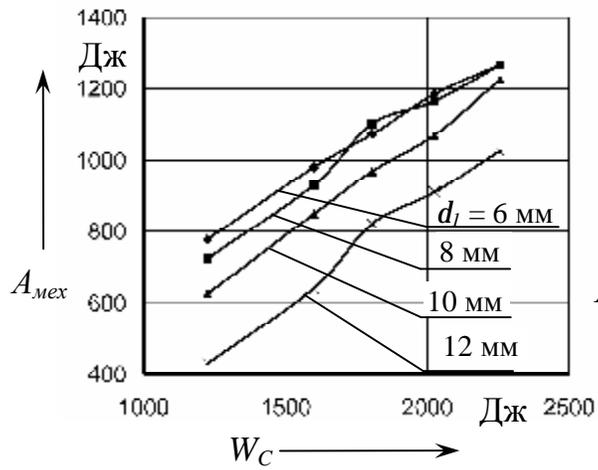
- смещение излучающей плиты относительно основания $X_{i . o} = 2,9$ мм (разбег ударника 3 мм, зазор в электромагните 10 мм).

5) Интервал изменения значений перемещения излучающей плиты (при $U_{Cн} = 950$ В) 2 – 2,9 мм.

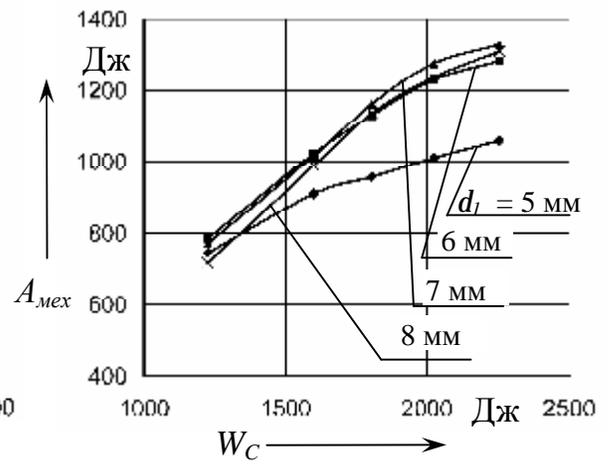
6) Интервал от момента начала процессов в системе (начала ввода энергии в обмотку) до выбора зазора изменяется в пределах от 4 до 9 мс. Момент максимума тока стабилен и составляет 2 мс от начала разряда.

Остальные зависимости вида кривых от различных параметров и их причины в режиме удара аналогичны режиму давления.

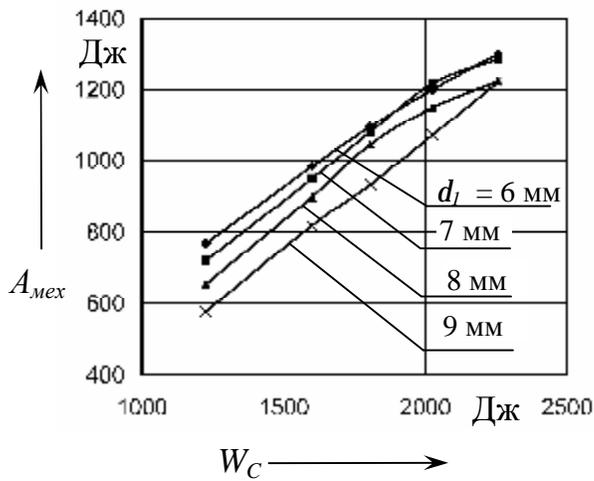
7) На рис. 4.26 – 4.28 приведены составляющие энергетического баланса, те же, что и в режиме давления, кроме потерь в стали магнитопровода, т.к. они являются одинаковыми во всех режимах для соответствующих зазоров.



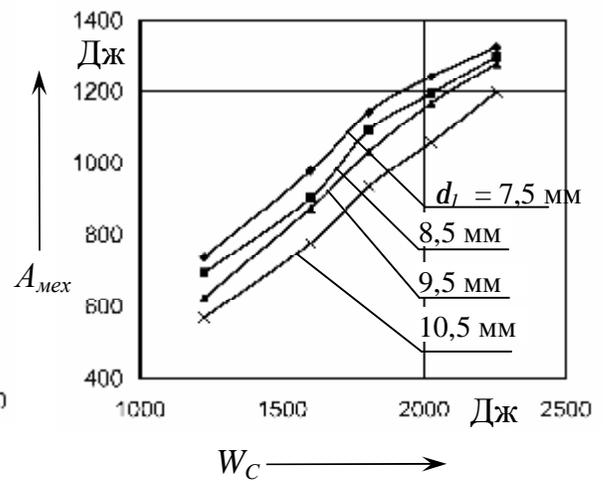
а) разбег ударника 3 мм,



б) разбег ударника 4 мм,

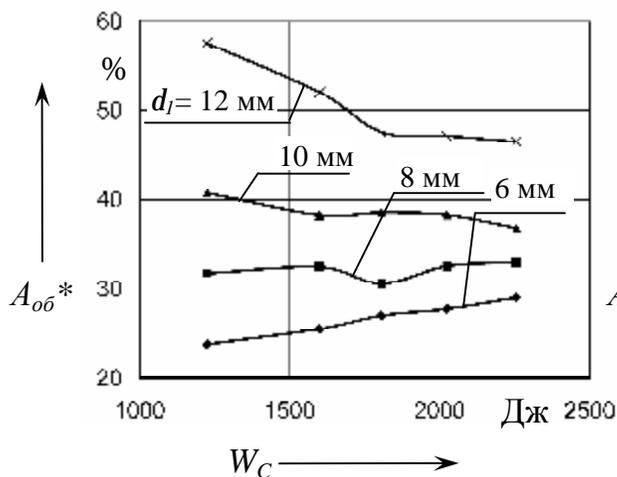


в) разбег ударника 5 мм,

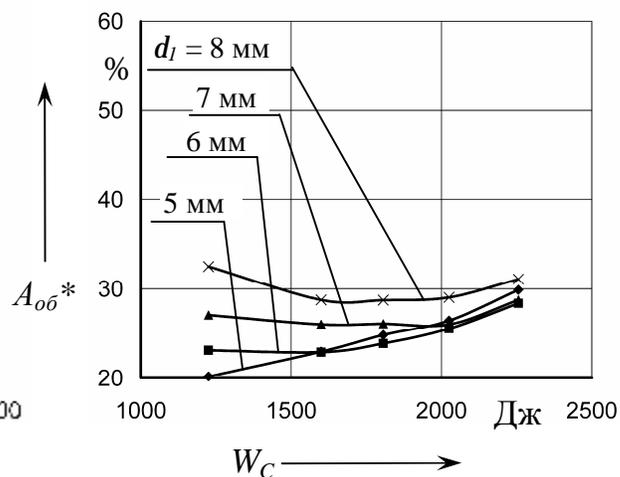


г) разбег ударника 6,5 (при $d_l = 7,5$ и $8,5$ мм) и 8,5 мм (при $d_l = 9,5$ и $10,5$ мм)

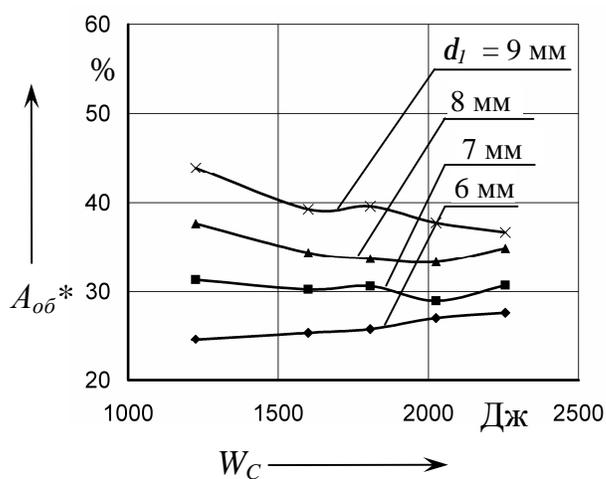
Рис. 4.26. Механическая энергия.



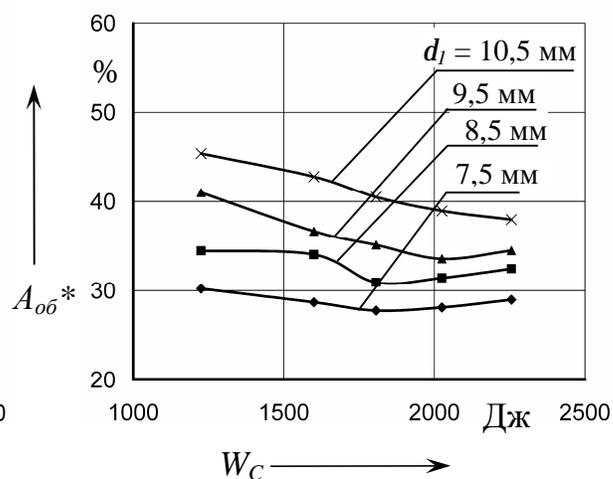
а) разбег ударника 3 мм,



б) разбег ударника 4 мм,

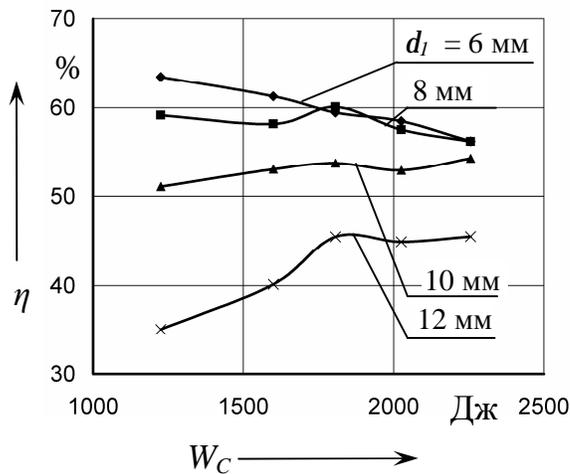


в) разбег ударника 5 мм,

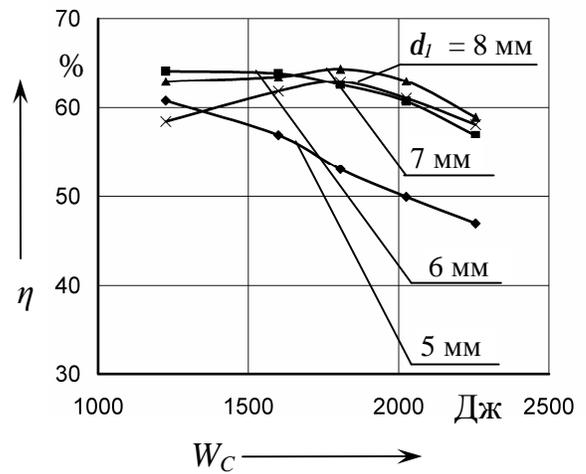


г) разбег ударника 6,5 (при $d_l = 7,5$ и $8,5$ мм) и 8,5 мм (при $d_l = 9,5$ и $10,5$ мм)

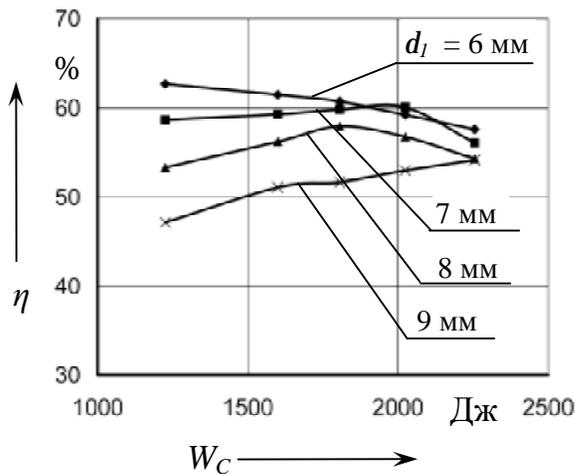
Рис. 4.27. Относительные потери в обмотке.



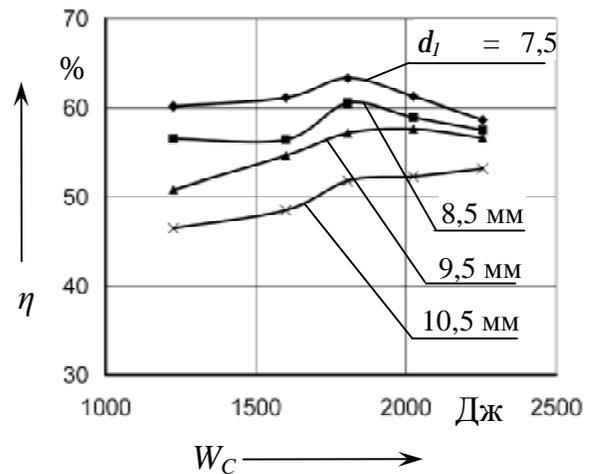
а) разбег ударника 3 мм,



б) разбег ударника 4 мм,



в) разбег ударника 5 мм,



г) разбег ударника 6,5 (при $d_i = 7,5$ и $8,5$ мм) и 8,5 мм (при $d_i = 9,5$ и $10,5$ мм)

Рис. 4.28. КПД электромеханического преобразования.

С учётом выводов и замечаний, сделанных ранее (в п.п. 4.1.2, 9 позиция в анализе экспериментальных данных) по энергетическому балансу в режиме давления, используя рис. 4.26 – 4.28, отметим следующее.

- На диапазоне значений зазора (в электромагните), который выбран для исследований в режиме удара, наблюдается практически линейное увеличение механической энергии с ростом начальной энергии накопительного конденсатора (рис. 4.26). Причём такая зависимость характерна для большинства кривых, т.е. величина разбега ударника сказывалась на их взаимном расположении, но незначительно влияла на скорость изменения значений в них.

- Семейство кривых при значении разбега ударника $d_2 = 4$ мм образуют поверхность (рис. 4.29), которая располагается выше поверхностей, полученных аналогично для других значений разбега. При этом превышение значений очевидно на всём диапазоне из пересекающихся множеств значений параметров, а

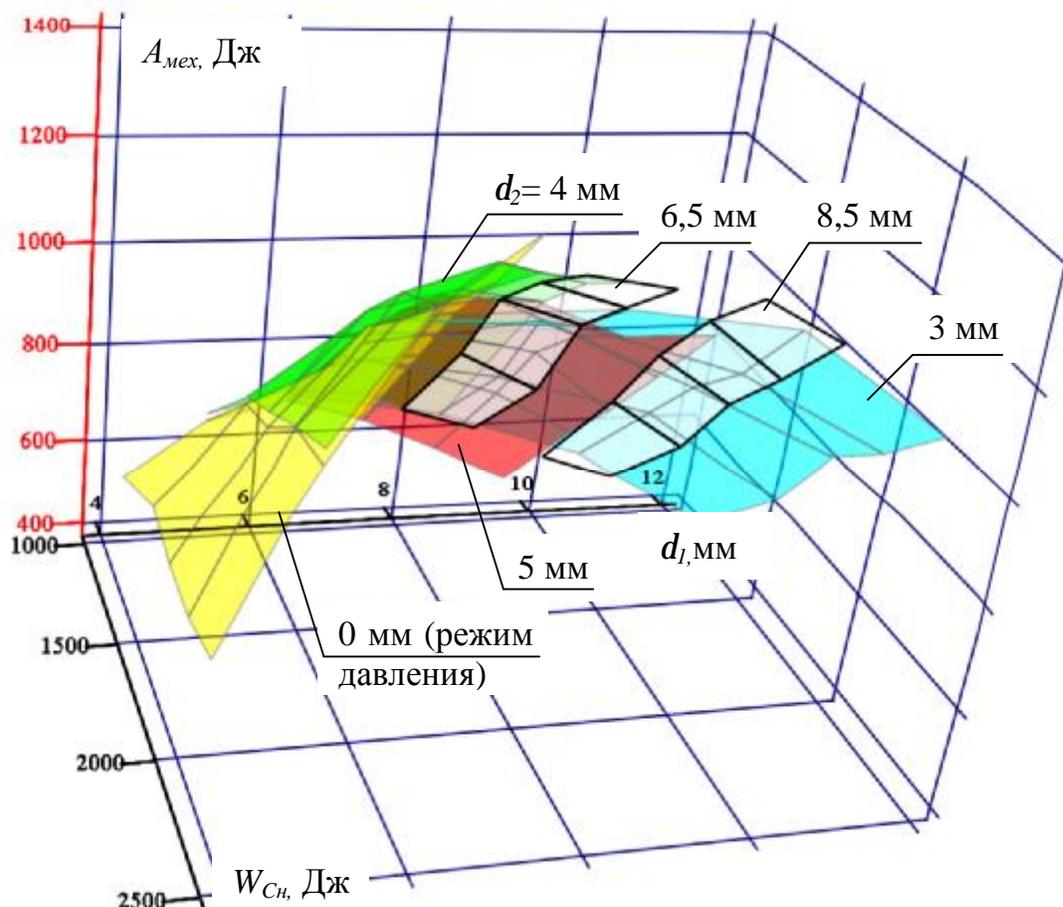


Рис. 4.29. Поверхности значений механической энергии.

область максимальных значений расположена между значениями зазора в электромагните 6 и 8 мм.

Рис. 2.28, дополненный поверхностью для режима давления, иллюстрирует, что исследованная установка в описанных условиях производила максимальную механическую работу на упомянутом диапазоне значений зазора в электромагните (6-8 мм), причём, при любых значениях энергии накопителя.

- Потери в стали, как уже отмечалось ранее, не зависят от разбега ударника. При этом, с учётом больших значений начального зазора в электромагните, в режиме удара они не превышают 25%, а в большинстве случаев ограничиваются уровнем 10–15 %.

- Величина потерь в обмотке возбуждения ($A_{об}^*$) варьируется в широких пределах: от 20 до 60% от начальной энергии накопителя (рис. 4.27). Такой разброс значений связан с тем, что режим удара для импульсных сейсмоисточников с электромагнитным приводом исследовался впервые, а значит, – требовалось охватить большую область значений параметров (зазоров) нежели для режима давления.
- Первостепенное влияние на потери в обмотке имеет величина зазора в электромагните. Её рост однозначно приводит к их возрастанию. Поверхности потерь в обмотке, образованные семействами кривых характеризующихся одинаковым значением разбега ударника (включая $d_2 = 0$, в режиме давления) в совокупности образуют желобовидную общность (рис. 2.27). Дно желоба характеризуется минимальными потерями $A_{об}^*$, а его проекция на плоскость $W_{Сн}-0-d_l$ проходит от, примерно, $d_l = 4$ мм на минимальной энергии емкостного накопителя $W_{Сн}$ (1225 Дж) до, примерно, $d_l = 7$ мм, когда энергия $W_{Сн}$ принимает максимальное значение (2256 Дж).

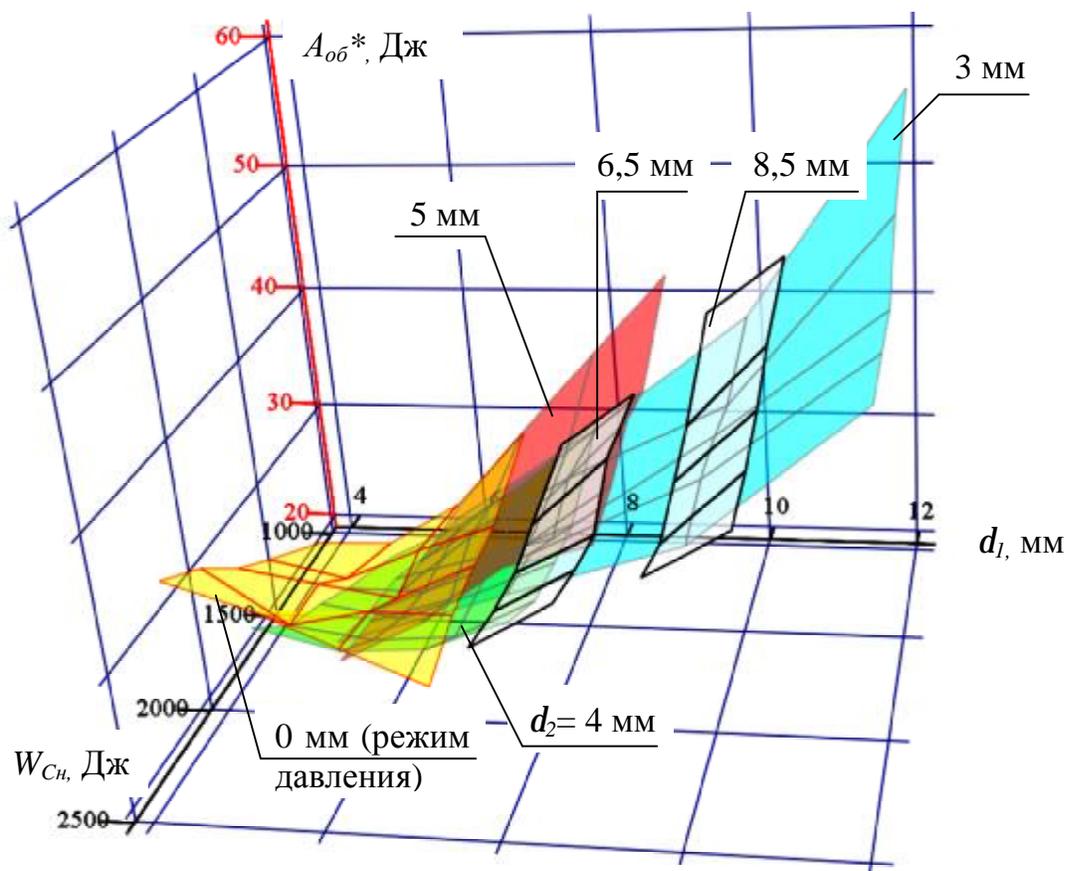


Рис. 4.30. Поверхности значений потерь в обмотке.

- КПД электромеханического преобразования в режиме удара изменяется в пределах от 35 до 65 %. В отличие от режима

давления, где увеличение зазора d_l ведёт к росту КПД в режиме удара, кроме такого участка, есть бо́льший участок уменьшения КПД при росте зазора d_l .

На рис. 4.31 данные о зависимости КПД от различных параметров представлены в трёхмерном виде. Как и в случае с другими составляющими энергетического баланса, из такого представления (рис. 4.31) можно увидеть, что общность всех поверхностей образует упорядоченную картину. Словами представленное на ней можно описать как желоб, расположенный краями вниз (к плоскости $W_{Сн}-0-d_l$), с вершиной желоба (шириной в диапазоне $d_l = (5,5...8)$ мм), идущей параллельно упомянутой плоскости и вдоль оси $W_{Сн}$.

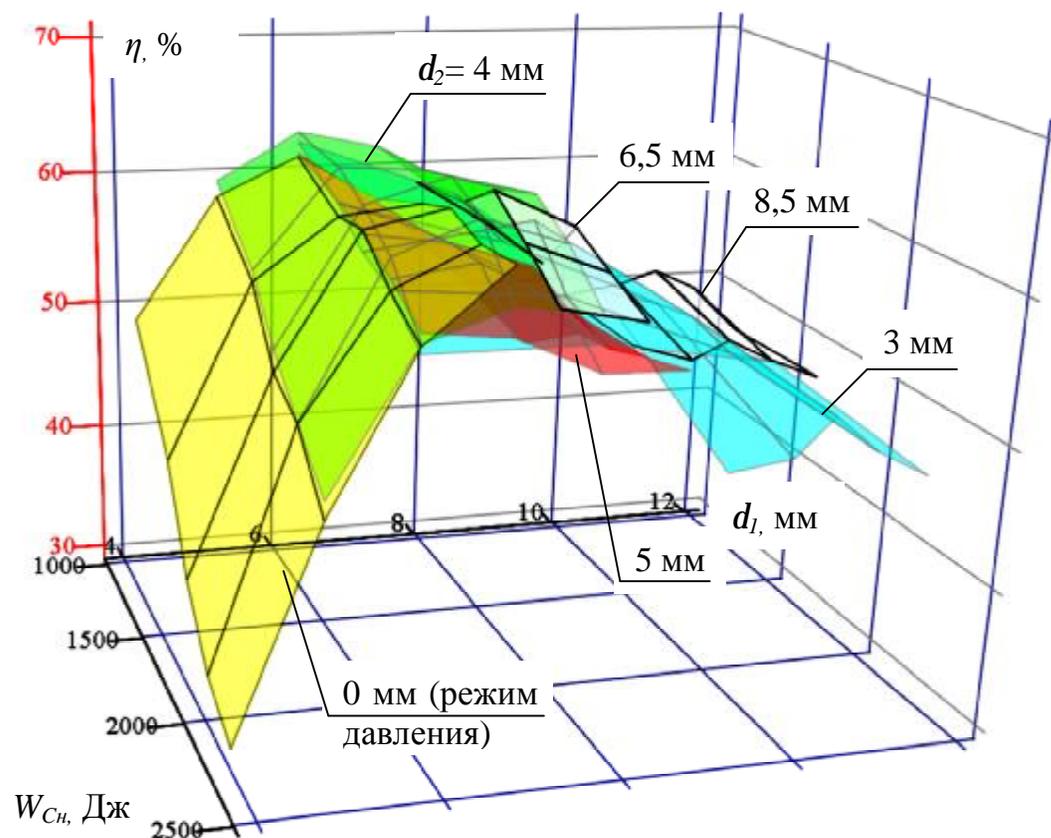


Рис. 4.31. Поверхности КПД электромеханического преобразования.

КПД в окрестности вершины упомянутой общности поверхностей с увеличением $W_{Сн}$ изменяется в небольших пределах для всех исследованных сочетаний зазоров. Это важно, т.к. возрастание совершаемой механической работы $A_{мех}$ за счёт увеличения начальной энергии $W_{Сн}$ будет максимальным, не сопровождающимся ростом суммарных потерь.

- Из рассмотрения данных о механической энергии и КПД электромеханического преобразования следует вывод, что желательно обеспечивать работу в режиме удара в диапазоне зазора

в электромагните $d_l = (5,5...8)$ мм. При эксплуатации установки также следует учитывать, что градиент поверхностей со стороны больших значений зазора меньше.

4.1.4. Оценка эффективности режимов.

Проведённые множественные измерения и зафиксированные осциллограммы тока обмотки, потока полюса и ЭД позволяют характеризовать свойства сейсмоисточника, его эффективность только со стороны его системы как таковой. Эти полученные данные дают информацию о том, насколько эффективно и при каких условиях происходит энергопреобразование от энергии электрического поля конденсаторной батареи в магнитное поле электромагнита и далее в механическую энергию движущихся частей сейсмоисточника. На основе этих данных составляется представление о готовности сейсмоисточника эффективно сформировать воздействие исполнительного органа (излучающей плиты) на нагрузку, о способах регулирования воздействия различными параметрами. То есть получается информация о готовности взаимодействия со средой. Но важнее всего знать работу сейсмоисточника по взаимодействию с нагрузкой: в конечном итоге именно такая информация будет определяющей для выбора из возможных режима функционирования (давления, удара) и его параметров (механических, электромагнитных). Поэтому в качестве доступных в лабораторных условиях критериев оценки взаимодействия источника с нагрузкой был принят сигнал отклика сейсмоприёмника, который фиксировался осциллографом при различных задаваемых параметрах.

На рис. 4.32. представлена зависимость амплитуды первого вступления сигнала отклика сейсмоприёмника от величины зазора в электромагните. При всех начальных энергиях накопителя приведено только два семейства кривых: для режима давления и для наилучшего из ударных режимов. Для других ударных режимов приведены лишь одиночные кривые, полученные при максимальной начальной энергии накопителя, соответствующей максимальному напряжению на нём (2256 Дж/ 950 В).

Из сравнения приведённых на рис. 4.32 кривых видно, что возможно получение большей сейсмической эффективности при переходе от режима давления к режиму удара. При этом следует учитывать две особенности перехода в режим удара: во-первых - что есть область параметров, при которых ударный режим становится заметно менее эффективен, чем режим давления. Во-вторых, что значительный выигрыш перед режимом давления получается при данных параметрах только на данной нагрузке и, чтобы этот выигрыш получить на другой нагрузке, необходимо изменить параметры сейсмоисточника (в данном случае речь идёт о зазорах – в электромагните и между ударником и прокладкой плиты).

Фактор необходимости изменения параметров под конкретную нагрузку существенно смягчается тем, что изменение параметров реальной нагрузки (особенно водной) происходит в пределах одного порядка – значит подстраиваться нужно под конечный, обозримый диапазон. Кроме того,

полученные кривые не имеют резких переходов между областями эффективной и неэффективной работы, т.е. позволяют говорить об области наибольшей эффективности с заданным отклонением.

Без изменения нагрузки в лабораторных испытаниях удалось убедиться в главном – что:

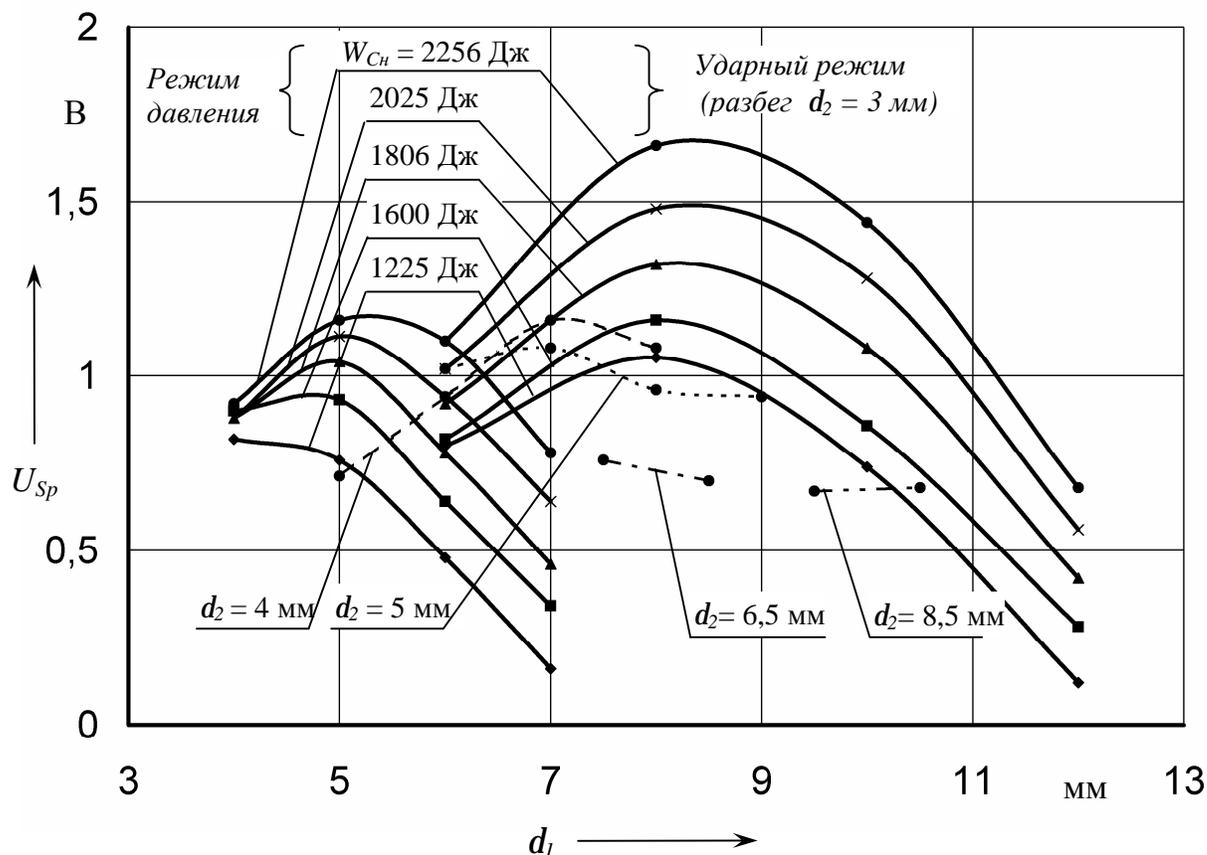


Рис. 4.32. Зависимость амплитуды первого вступления сигнала отклика сейсмоприёмника от величины зазора в электромагните.

1) при несложных перенастройках можно выйти на приемлемое качество работы на данную нагрузку;

2) возможен значительный выигрыш от использования режима удара. При этом задачу подбора параметров необходимо решать уже на реальной нагрузке, с использованием более точных средств и методов определения сейсмической эффективности.

4.1.5. Некоторые данные полевых испытаний.

Без данных полевых испытаний, информация, содержащаяся в п.п. 4.1.1–4.1.5 позволила делать выводы об особенностях и закономерностях функционирования установки, а также показать различие режимов работы. Но для получения количественных рекомендаций к проектированию промышленных образцов или, хотя бы, к заданию направлений дальнейших исследований этого недостаточно. Необходимо сопоставление конечных,

сейсмических данных с соответствующими данными о функционировании установки на реальной нагрузке, т.е. в полевых условиях.

Факторами, препятствующими проведению таких полномасштабных испытаний являются высокая стоимость работ с сейсмическими испытаниями (сотни тысяч рублей), с одной стороны, и новизна испытываемой установки порождающая риск получить результаты не оправдывающие затраты, с другой. Кроме того, в совокупности, варианты внешних условий, условий возбуждения, внутренних параметров установки и количество величин, возможных к измерению, способны составить большой объём данных, требующий соответствующих временных затрат.

Поэтому полевые испытания было решено проводить с существенно ограниченным количеством наборов значений параметров установки. При этом учитывались некоторые рекомендации, полученные в ходе лабораторных испытаний (например, большинство значений зазора в электромагните было взято из рекомендованного диапазона 6–8 мм (по п.п. 4.1.3); величину разбега ударника выставили равной 3 мм (по п.п. 4.1.4.)).

Энергетический баланс.

На рис. 4.33 приведены составляющие энергетического баланса.

По рис. 4.33 можно отметить следующее.

- Учёт рекомендаций составленных по результатам лабораторных испытаний и, возможно иные параметры нагрузки позволили достичь заметно больших значений КПД (рис. 4.33в), чем в лабораторных испытаниях. Так, если ранее диапазон изменения КПД был 30–65% (рис. 4.22 и 4.28), то при полевых испытаниях он имеет границы 47–73%.
- Самыми невыгодными режимами, исходя из рис. 4.33, являются режимы:
 - с заведомо (здесь и далее на основании результатов лабораторных испытаний) малым зазором в электромагните $d_1 = 5$ мм;
 - с заведомо большим зазором в электромагните $d_1 = 9,5$ мм (однако, с учётом восходящего характера кривой, возможно достижение больших значений КПД при больших начальных энергиях емкостного накопителя);
 - с излишней величиной разбега ударника $d_2 = 6$ мм (при $d_1 = 7,5$), т.к. в этом случае сила электромагнита действует через ударник на излучатель малое время выбора зазора ($d_1 - d_2 = 7,5 - 6 = 1,5$ мм). Указанная невыгодность режима проявилась при испытаниях на воде в меньшей степени. Более того, режим с соотношением зазоров $d_2 = 6$ мм при $d_1 = 7,5$ мм для водной среды оказался наилучшим (по КПД электромеханического преобразования). Однако при больших энергиях накопителя снижение кривой КПД упомянутого режима (6/7,5) больше, чем в каком-либо другом режиме.

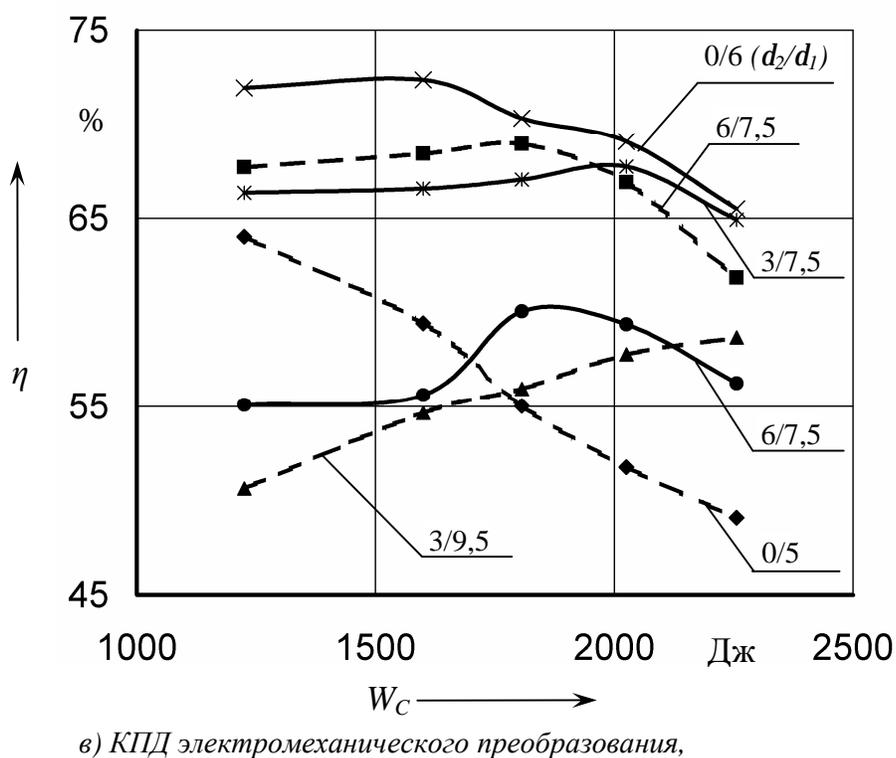
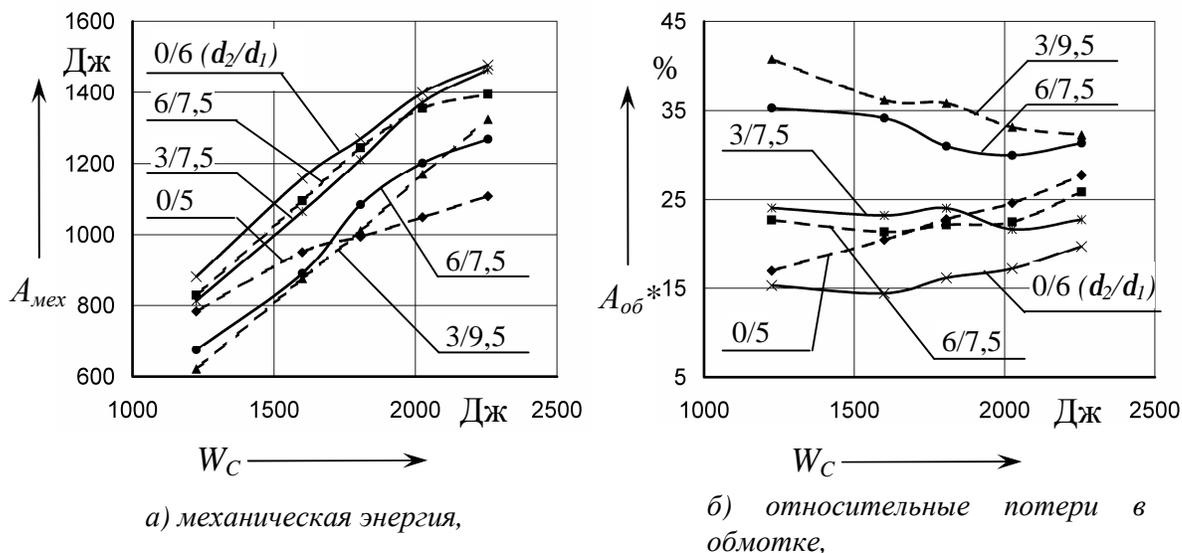


Рис. 4.33. Составляющие энергетического баланса, рассчитанные по данным с полевых испытаний на воде (обозначены штриховыми линиями) и суше (обозначены сплошными линиями)

- КПД прочих режимов достаточно высок и изменяется в диапазоне 62–73%.
- Скорость увеличения механической энергии с ростом начальной энергии емкостного накопителя практически одинакова для всех режимов, кроме режимов с зазором в электромагните $d_l = 5$ мм и

менее (по рис. 4.19, 4.26, 4.33). В указанном режиме она меньше, вследствие быстрого роста потерь.

- Наилучшим (по КПД электромеханического преобразования) режимом работы на суше стал режим с соотношением зазоров ($d_2 = 0$ мм, $d_1 = 6$ мм)
- Водная среда, как нагрузка, позволяет организовывать работу сейсмоисточника с приемлемыми значениями КПД электромеханического преобразования.

Механические характеристики.

На основании экспериментальных данных по измерению перемещений ударника и излучающей плиты был сделан вывод о том, что *поведение установки на воде и земле механически существенно отличается.*

Как следует из сравнения графиков перемещений на воде (рис. 4.34) и земле (рис. 4.35), во-первых – на воде амплитуда смещения излучающей плиты существенно выше, чем на земле. Это объясняется текучестью водной среды: перемещающаяся излучающая поверхность не только излучает акустическую волну, но и выдавливает жидкость из-под мембраны.

Во-вторых, на воде большую часть перемещения излучающая плита и ударник делают по инерции, без действия силы со стороны двигателя. Это очевидно, так как рабочий ход двигателя (когда он в принципе может воздействовать на ударник и излучатель) составляет малую часть от хода ударника и излучателя.

В-третьих, на графиках перемещений полученных при работе на воде виден горизонтальный участок, т.е. отсутствие перемещения излучателя относительно основания. На данном участке якорь и индуктор, выбравшие зазор удерживаются в "залипшем" состоянии электромагнитной силой, вызванной протеканием тока через обмотку электромагнита. При этом ударник, а значит, и излучатель удерживаются в нижнем положении под действием силы веса индуктора с пригрузом. Электромагнитная сила, обеспечивающая такое состояние, постепенно уменьшается, так как ток затухает на активных сопротивлениях обмотки, проводов и диода. И, в момент, когда выравнивается значение электромагнитной силы и силы гидростатического давления на мембрану, происходит отрыв якоря от индуктора и возврат механической системы в исходное состояние. Большая энергия накопителя обеспечивает более поздний отрыв, так как затухает при этом больший ток.

На земле указанного явления (горизонтальной "полки") не наблюдается, так как грунт не может "растечься" из-под мембраны, а значит, якорь отрывается от индуктора силой веса установки.

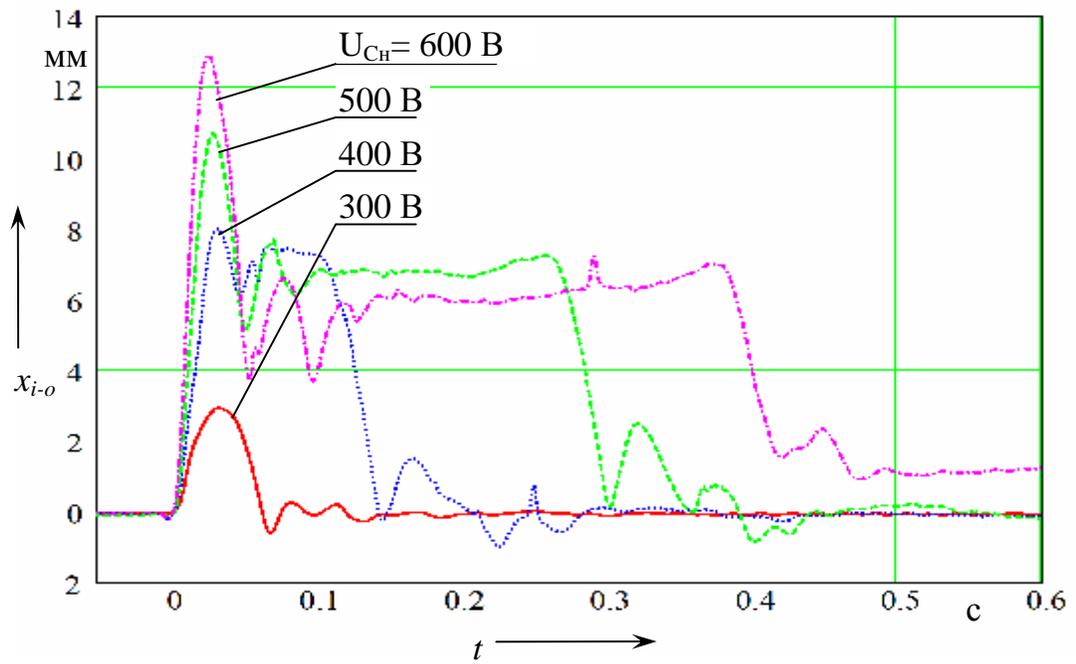


Рис. 4.34. Перемещения излучателя относительно основания для зазоров 0 (разбег) и 7,5 (в электромагните) мм. На воде.

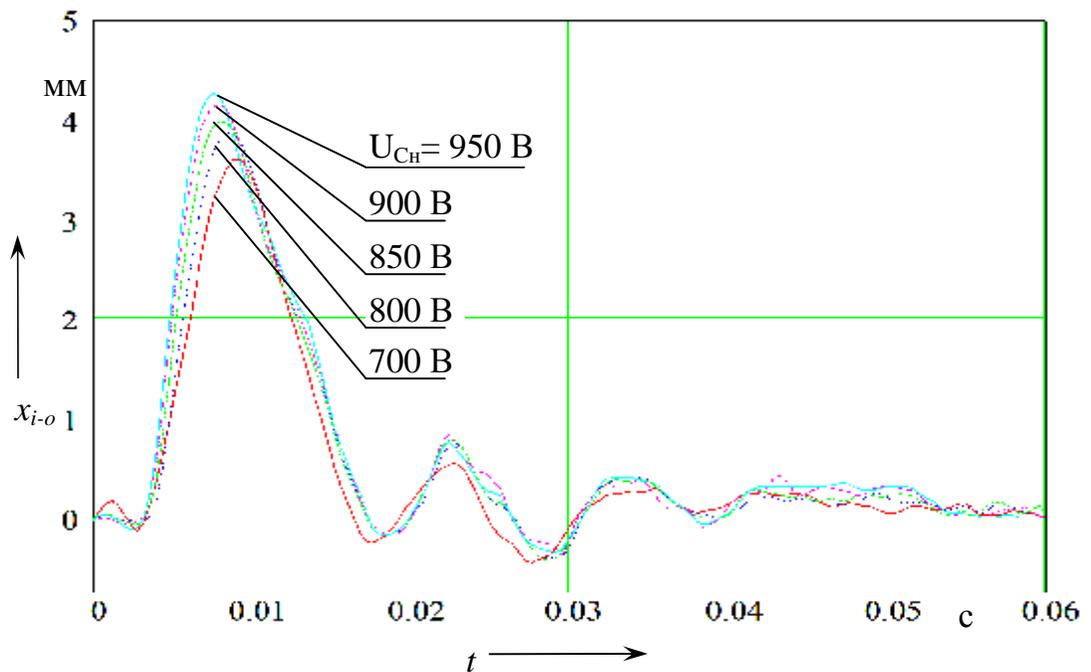


Рис. 4.35. Перемещения излучателя относительно основания для зазоров 0 (разбег) и 6 (в электромагните) мм. На земле.

4.2. Сейсмические испытания

С 17.05 по 07.06 2004 года были проведены полевые испытания водного импульсного электромагнитного сейсмоисточника "Аква". Испытания проводились согласно договору, заключённому между ОАО "Тюменнефтегеофизика" (заказчик) и ОАО "Саратовнефтегеофизика" (исполнитель), при участии авторов-разработчиков сейсмоисточника "Аква" – Научно-исследовательской лаборатории №6 Тольяттинского государственного университета.

Так как полевые испытания "Аква" проводились впервые, а источники подобного типа существуют лишь в единичных экземплярах, то это определило основную цель проводившихся работ.

Итак, **основной целью** выполненных испытаний являлось установление принципиальной возможности получения сейсмического сигнала при использовании сейсмоисточника "Аква", использующего новые, для водной сеймики, принципы.

Дополнительная цель – определение влияния режимов работы установки и внешних условий на получаемый сейсмический результат, для поиска возможностей оптимизации и совершенствования установки.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи.

1. Регистрация и анализ отражений от целевых горизонтов по прослеживаемости, спектральному составу и отношению "сигнал-шум" в сравнении с виброисточником, при работе сейсмоисточника "Аква" в различных режимах и при различных условиях.

2. Получение и анализ данных по поведению установки "Аква" (схемы питания, электромагнитного привода, механической системы) при работе сейсмоисточника в различных режимах и при различных условиях.

Основной и принципиально значимой задачей являлась первая. Так как её решение должно было дать ответ о перспективах впервые исследуемого направления водной сеймики. Положительные результаты решения первой задачи могут содержать рекомендации о:

- 1) наилучшем режиме работы (А, В, С);
- 2) необходимости группирования сейсмоисточников;
- 3) необходимом количестве накоплений сигнала;
- 4) условиях эксперимента (глубина водного слоя; наземные испытания) при которых установка показала наилучший результат;
- 5) особенностях получаемых сигналов при различных режимах и условиях.

Наибольшую эффективность результаты решения второй задачи могут принести при сопоставлении их с результатами решения первой. При этом решение второй задачи направлено на обеспечение надёжной и экономичной работы установки в наилучшем режиме при заданных условиях.

4.2.1. Проведённые работы.

Испытания установки проводились на водохранилище в Саратовской области, вблизи села Любимово.

Для получения сравнительной информации работа установки была проведена как с поверхности воды (рис. 4.36 а), так и с земли (рис. 4.36 б). В обоих случаях условия эксперимента (см. ниже) изменялись одинаково.



а) испытания на воде



б) испытания на земле

Рис. 4.36. Сейсмоисточник "Аква" на полевых испытаниях

Условия эксперимента (см. выше) изменялись аналогично. Однако зазоры для режимов А, В и С несколько отличались от зазоров, выставленных при водных испытаниях (А: 3/7,5; В: 0/6; С: 6/7,5).

4.2.2. Обработка полученных материалов.

Обработка и сейсмического материала и часть выводов (п.п. 4.2.3, п. 1 – 4 выводов) по ним делались в ОАО "Саратовнефтегеовизика".

По полученным сейсмограммам от каждого источника выполнялись следующие операции:

- считывание исходных записей;
- регулировка амплитуд в широком скользящем окне и фильтрации 10-14 – 60 – 70 Гц;
- корректирующая фильтрация режекторным фильтром 50 Гц (модификация Р1) для понижения диапазона разброса амплитудно-энергетических параметров и снижения уровня 50-герцовой наводки и высокочастотного шума;
- определение спектральных характеристик (выборочно);
- определение отношения сигнал/шум;
- определение разрешенности записи;
- определение комплексного параметра, включающего отношение S/N и разрешенность записи.

Сами определения количественных характеристик выполнялись с предварительным введением кинематических поправок с использованием программы RESOL в фиксированных окнах: W3 – 0,64-0,78 сек, 1-12 каналы и W4 – 2,26-2,74 сек, 12-34 каналы (рис. 4.37).

4.2.3. Выводы по результатам сейсмических испытаний.

Анализ приведенных осредненных данных по основным параметрам количественных оценок позволяет сделать следующие выводы.

1. На относительно малых T_0 (W3) по параметрам S/N и осредненным амплитудам сейсмограммы от источника "Аква" в 1,5-2 раза превышают аналогичные от вибратора.

В то же время, затухание зарегистрированных от источника "Аква" колебаний происходит гораздо быстрее, чем от виброисточника. Так, если для вибратора значение параметра S/N (сигнал/шум) в интервале от 0,7 сек (W3) до 3 сек (W4) уменьшается приблизительно в два раза, то для "Аква" диапазон затухания существенно больше – от 2 до 10 раз и более. Причем уменьшить величину перепада увеличением числа воздействий не удастся. Для подтверждения сказанного приведем отношения S/N (W3) : S/N (W4) соответственно при 10, 20 и 30 воздействиях в режиме С (глубина дна 0.8 м) = 11.75 – 14.31 – 12.2.

Для параметра амплитуд величина перепада меньше – от 2,7 до 3,3 (при виброисточнике – 2).

2. Для оценки режимов (А, В, С) в окнах W3 и W4 были найдены значения основных количественных параметров, характеризующих запись:

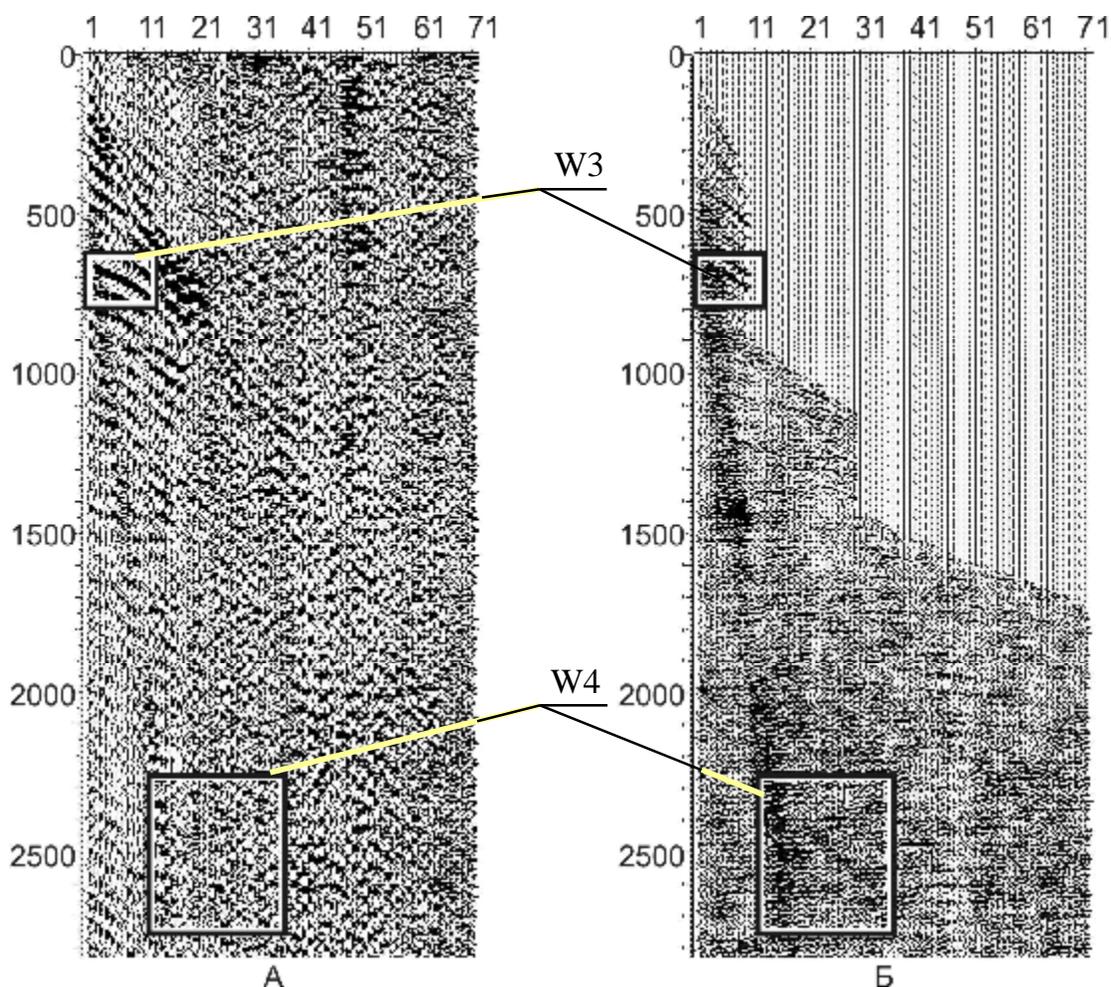


Рис. 4.37. Окна W3 и W4 на сейсмограммах: А – сейсмограмма после полосовой фильтрации и регуляции амплитуд; Б – после деконволюции и подавления волн-помех.

- S/N (отношение сигнал/шум),
- Ampl (средняя по окну амплитуда сигнала),
- RP (разрешённость записи)
- RPN (сводный параметр, учитывающий и RP и S/N).

Далее из осреднённых параметров для 10 накоплений были выделены максимальные. На основании совокупного числа максимумов и были сделаны выводы об оптимальности режимов на воде и суше.

Установили, что **наиболее оптимален для воды режим свободного ускорения** (26 максимумов). Менее эффективен режим давления (10 максимумов). Худший результат (1 максимум) – у промежуточного режима.

При использовании источника "Аква" **на суше оптимальным признан режим давления** (7 максимумов). Несколько менее эффективен промежуточный режим (5 максимумов). Наименее эффективен режим свободного ускорения (0).

3. Из сопоставления амплитудно-энергетических характеристик при разной глубине дна установили, что наиболее высокие они при глубинах 0,8-2 м и существенно падают для глубины водоема 9,5 м.

4. Вышеприведенные заключения, сделаны по количественным оценкам сейсмограмм, по которым выполнены лишь две процедуры: “мягкая автоматическая регулировка амплитуд и полосовой фильтр в сочетании с режекторной фильтрацией”.

После деконволюции и подавления волн-помех сейсмограммы в определенной мере выравниваются и визуально, и по амплитудно-частотным характеристикам. Общее впечатление – при относительном визуальном выравнивании некоторые записи с источником "Аква" характеризуются понижением уровня полезных отражений на временах T_0 1-1,9 сек в пределах конуса, ограниченного веером помех с V^* порядка 300-400 м/с. Да и сам уровень указанных помех в целом выше, чем для виброисточника.

Однако, учитывая, что накапливание по ОГТ в какой-то мере повысит уровень полезных волн с одновременным ослаблением веера помех, можно констатировать, что источник "Аква" вполне приемлем для возбуждения колебаний в рекомендованных выше режимах на воде и на суше.

В дальнейшем желательным является проведение сравнения не только на уровне сейсмограмм, но путем отработки профиля с виброисточником и с источником "Аква".

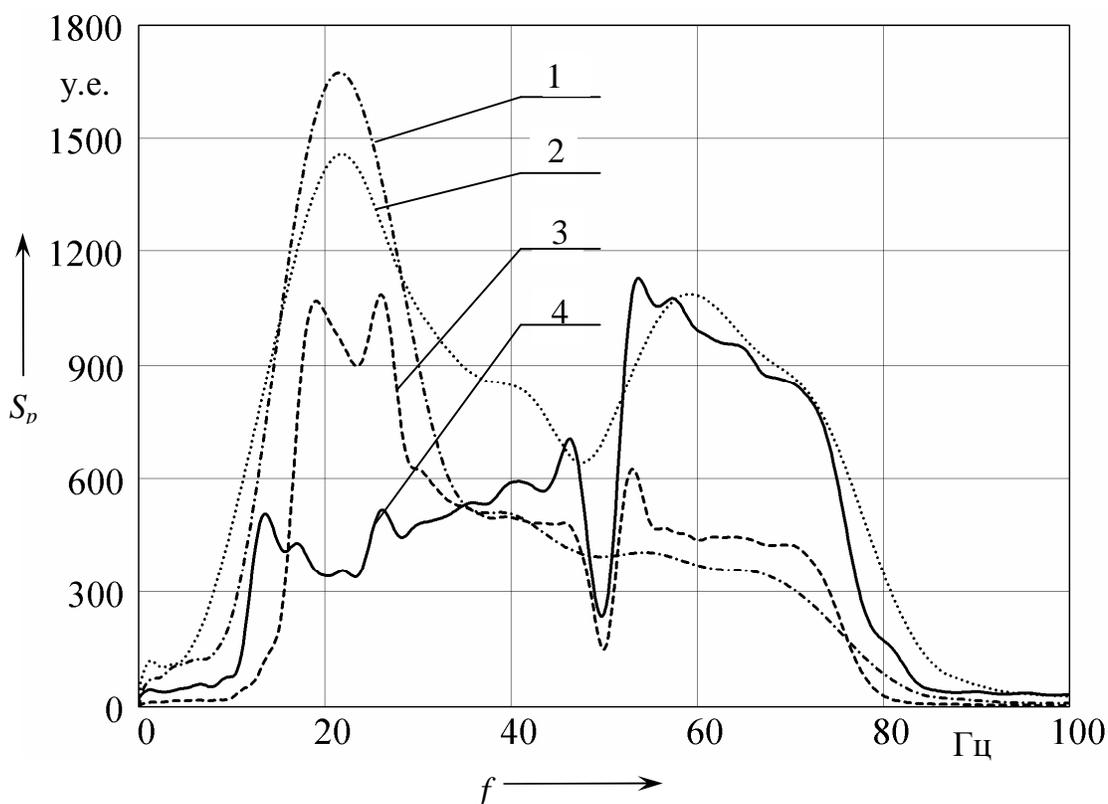
5. Из анализа значений амплитуд при различных условиях и в разных режимах, представляет интерес следующее:

- не прослеживается влияние величины начальной энергии емкостного накопителя на амплитуду сигнала. Причиной этому могут быть два обстоятельства: особенность методики определения амплитуд и/или "насыщенность" системы участвующей в механико-акустическом преобразовании;

- в окне W3 средняя амплитуда сигнала растёт при увеличении числа накоплений с 1 до 10, при дальнейшем увеличении числа накоплений (20, 30 накоплений) увеличение амплитуды незначительно (в единицы и десятки раз меньше);

- в окне W3 увеличение глубины водного слоя (и удаление от приёмной косы) вызывает снижение амплитуды сигнала, но не более чем в 2 раза. В окне W4, наоборот, наблюдается бо́льший сигнал при бо́льшей глубине, что не позволяет делать однозначные выводы об ограниченности использования сейсмоисточника типа "Аква" мелководьем.

6. На рис. 4.38 приведены усреднённые спектры сигналов ($S_p = f(f)$), принятых сейсмической косой. Согласно замечанию специалистов Партии обработки ГЭЦОИ ОАО "Саратовнефтегеофизика" спектрам, рассчитанным в окне W3 свойственно бо́льшее искажение из-за наличия эффектов Гиббса (осцилляции и флуктуации в краевых частях спектра). Однако при наличии этих спектров можно отметить адекватное реальности снижение амплитуды



- 1 – рассчитано в окне W3 по первичному материалу с регулировкой усиления;
 2 – рассчитано в окне W3 по материалу с полным циклом обработки;
 3 – рассчитано в окне W4 по первичному материалу с регулировкой усиления;
 4 – рассчитано в окне W4 по материалу с полным циклом обработки;

Рис. 4.38. Усреднённые АЧХ сигналов, принятых сейсмической косой.

сигнала и изменение вида амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при переходе к спектрам, рассчитанным по более удалённому окну W4.

Как видно из рис. 4.38, система "сейсмоисточник – внешняя среда – сейсмоприёмники" ограничивает частотную область принимаемых сигналов диапазоном, примерно от 15 до 75 Гц. При желательности корректировки этого спектрального диапазона необходимо проведение исследования не только сигналов принимаемых сейсмической косой, но и исходного сигнала, излучаемого сейсмоисточником.

4.3. Перспективные конструктивные решения сейсмоисточника

4.3.1. Сейсмоисточник с непосредственным взаимодействием ударника с водой.

Изучение работы сейсмоисточника в различных условиях и режимах, в лабораторных и полевых условиях позволило разработать предложения по его модернизации, которые были учтены в новой конструктивной схеме водного сейсмоисточника. Новая конструкция проработана до рабочих чертежей и

имеет, по сравнению с сейсмоисточником "Аква" (рис. 2.2), следующие преимущества:

- повышенную простоту конструкции;
- отсутствие излучающей плиты 2 – промежуточного звена передающего усилие двигателя и испытывающего повышенные механические нагрузки;
- существенное упрощение герметизации узла сочленения собственно сейсмоисточника и плавсредства.

Указанные преимущества были получены за счёт следующих конструктивных решений (рис. 4.39). Ударник 5 размещён в "стакане" со стенками расположенными выше уровня осадки плавсредства и приведён в непосредственный контакт с водой. Положение ударника зафиксировано за счёт поджатия пружинами 4 к пригрузу 10, опирающемуся на плавсредство 1.

Для реализации режима работы привода аналогичного работе с наличием свободного, с минимальным сопротивлением хода якоря 7 и ударника 5 предложено специальное устройство – ресивер 12.

Работает ресивер 12 следующим образом. После начала движения ударника-излучателя 5 расположенный вблизи него ресивер при возникновении избыточного давления в воде уменьшает свой объём. Вследствие этого ударник 5 практически не встречает сопротивления среды и относительно свободно набирает скорость. В момент, когда свободный ход в ресивере выбран (внешняя эластичная оболочка легла на внутреннюю жёсткую, имеющую небольшие отверстия для перехода воздуха) возникает эффект гидравлического удара. Удар обусловлен тем, что с этого момента вблизи ударника 5 невозможно относительно свободное течение жидкости. При этом начинается основная передача кинетической энергии уже разогнавшегося ударника 5 в акустическое излучение. Наличие начальной скорости обеспечивает повышение механического импульса ударного воздействия на акустическую среду (воду). Предполагается, что благодаря регулировке разницы между начальным и конечным объёмом ресивера, а также длительности действия силы двигателя, возможно изменение спектра излучаемого сигнала и повышение согласованности работы сейсмоисточника на нагрузку (водную среду).

Новизна описанного (а также возможных вариантов) технического решения конструкции поверхностного импульсного водного сейсмоисточника с электромагнитным приводом имеет подтверждение в виде патента РФ [91].

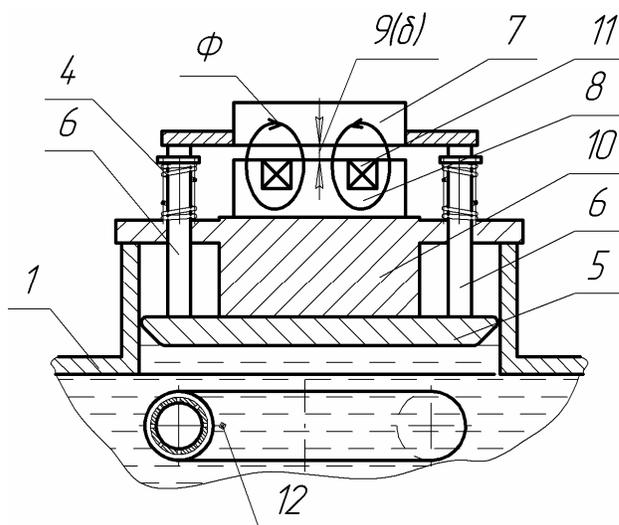


Рис. 4.39. Упрощенная механическая система модернизированного сейсмоисточника: 1 – днище плавсредства, 4 – пружины, 5 – ударник, 6 – стойки, 7 – якорь, 8 – индуктор, 9 – зазор d , 10 – пригруз, 11 – обмотка возбуждения, Φ – магнитный поток, 12 – ресивер

4.3.2. Наземно-водный сейсмоисточник.

Исторический взгляд на сейсморазведку позволяет заключить, что, во-первых, источники сейсмических колебаний для водной среды менее развиты, нежели наземные источники. Во-вторых, что разница в принципе действия наиболее распространённых водных источников – пневмопушек и наземных источников (импульсных и вибрационных) существенно затрудняет и удорожает сейсморазведку в областях с перемежающимся типом среды (вода-земля).

Подтверждениями такому заключению могут служить публично высказываемые мнения отечественных и зарубежных специалистов–геофизиков. Например [цитаты по 35]:

1) - "В последние годы наметился интерес к переходным (транзитным), от суши к морю, зонам, который обусловлен открытием крупных месторождений углеводородов в прибрежных районах ряда стран" (с. 5),

- "Дальнейшие перспективы <...>

В области возбуждения колебаний: совершенствование существующих и создание новых эффективных невзрывных источников сейсмических колебаний <...> (курсив наш – Д.Я.)" (с. 8),

(Шнеерсон М.Б., Шехтман Г.А., ВНИИГеофизика, г. Москва);

2) - "Транзитная зона – область с наименьшим уровнем исследований с самого начала проведения сейсморазведочных работ" (с. 10),

(Дэнис Могенот (Denis Mougenot), Серцел (Sercel), Франция);

3) - "<...> серьёзные перспективы в отношении потенциальной нефтегазоносности следует связывать и с относительно малоизученными, но самыми обширными в мире мелководными акваториями России и стран СНГ." (с. 14),

(Архипов А.А., ООО"Геошельф-Сервис", г. Геленджик).

Из сказанного выше видна перспективность невзрывных источников колебаний, способных работать как с поверхности земли, так и на водоёме. Такие наземно-водные сейсмоисточники-амфибии способны существенно снизить временные затраты на проход сложно профиля из-за отсутствия смены технологии возбуждения колебаний при переходах "суша-вода-суша". Кроме того, уменьшение типов (а значит и количества) средств возбуждения сейсмических сигналов, уменьшает затраты на транспортировку и упрощает их обслуживание.

Водный сейсмоисточник с импульсным электромагнитным приводом, описанный в настоящей работе может быть использован в качестве базы для реализации идеи наземно-водного сейсмоисточника. Такому решению задачи сейсморазведки транзитных зон благоприятствует три фактора:

1) высокий уровень разработки наземных импульсных электромагнитных сейсмоисточников;

2) наличие существенных преимуществ у предложенного в настоящей работе типа сейсмоисточников (п. 2.1.1);

3) наличие начальных аналитических и экспериментальных данных по водному сейсмоисточнику типа "Аква", в частности, приведённых в настоящей работе.

Выводы

1. Экспериментальным путём подтверждена адекватность результатов расчёта электромагнита выполненного в п.п. 2.2.3.

2. Определены количественные значения параметров, характеризующих работу сейсмоисточника, такие как:

- амплитуды тока обмотки, магнитного потока, индукции;
- длительность фронта (тока, силы);
- время выбора зазора при разных условиях и т.д.

3. В ходе форсировки (увеличения значения вводимой от емкостного накопителя энергии от 1225 до 2256 Дж) обнаружено проявление насыщения магнитной системы на виде ЭД и кривых тока обмотки электромагнита.

Установлено, что при переходе к верхней границе диапазона форсировки, снижается КПД электромеханического преобразования. Это происходит за счёт роста потерь в обмотке и магнитопроводе. Однако снижение КПД сопровождается ростом абсолютных значений механической энергии и развиваемой электромагнитом силы. Поэтому, можно заключить, что в рассматриваемой установке допустимо дополнительное увеличение форсировки. При этом предел увеличения должен определяться технико-экономическими критериями.

4. В ходе лабораторных исследований на твёрдой нагрузке была отработана методика получения и анализа данных по энергетическому балансу. Было обнаружено, что на указанной нагрузке КПД электромеханического преобразования имеет область максимальных значений. Она получена при значении разбега ударника 4 мм и ограничена диапазоном значений зазора в электромагните 6-8 мм. Здесь можно отметить, что с точки зрения энергетического баланса, режим давления уступает режиму удара в упомянутой области значений параметров последнего. Важным является также то, что указанной области максимального КПД соответствует область максимальных абсолютных значений механической энергии. Причём, в отличие от КПД, механическая энергия растёт на всём интервале значений вводимой энергии накопителя.

5. С помощью измерения отклика сейсмоприёмника на воздействия сейсмоисточника было подтверждено наличие разницы между режимами работы электромеханической системы в воздействии на нагрузку. Выявлены соответствующие рекомендуемые области значений соотношений зазоров (разбег ударника, мм/(диапазон зазора в электромагните, мм)): 0/(4-6), 3/(7-10), 4/(6-8), 5/(6-9).

6. Приведены некоторые характеристики работы сейсмоисточника в условиях полевых испытаний, позволившие:

- сделать вывод о верности выводов и рекомендаций, выполненных по результатам лабораторных испытаний;
- выявить разницу в механическом поведении установки на суше и на воде.

7. Представлены результаты сейсмических испытаний, показавшие принципиальную возможность получения достаточного сейсмического сигнала при использовании водного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом.

Следует обратить внимание, что наземные импульсные электромагнитные сейсмоисточники, имеющие аналогичный рассматриваемому водному сейсмоисточнику тип привода, эксплуатируют с использованием группирования. Так, например [27], сейсмоисточники "Геотон" в результате группирования образуют группу эквивалентную (по развиваемой силе двигателя) шести (!) исследовавшимся водным источникам. Этот факт позволяет обоснованно предполагать существенное увеличение (уже присутствующей!) сейсмической эффективности водных сейсмоисточников нового типа при их группировании.

8. На основе результатов сейсмических испытаний:

- сделана оценка сейсмической эффективности установки. Обнаружена сравнимость сейсмических сигналов от импульсного сейсмоисточника "Аква" и от наземного вибратора (на усилии 27 тс);
- подтверждена возможность работы сейсмоисточника "Аква" на малых глубинах. Что является актуальным для сейсморазведки транзитных зон;
- сделана оценка амплитудно-частотных характеристик, позволившая оценить частотный диапазон принимаемого сигнала (15 – 75 Гц);
- отмечена необходимость дальнейших исследований, уже с проходом участка профиля.

9. В результате изучения работы сейсмоисточника в различных условиях и режимах, в лабораторных и полевых условиях разработаны предложения по его модернизации. В том числе, предложена упрощенная конструкция водного сейсмоисточника без излучающей плиты, что направлено на повышение простоты и надёжности. На новую конструкцию и её варианты получен патент РФ на изобретение [91].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведённых исследований разработан экспериментальный образец поверхностного водного сейсмоисточника, содержащего импульсный силовой привод на основе короткоходового электромагнита, специальную систему электропитания и механическую систему, обладающую возможностью изменения режима формирования механического воздействия.

2. Анализ известных решений существующих водных сейсмоисточников позволил сформулировать базовые свойства, которые были приданы спроектированной установке:

- поверхностное расположение;
- применение высокоиспользуемого типа силового привода, для которого возможно обеспечить согласование с нагрузкой – водной средой;
- простота конструкции;
- отсутствие создания макронеоднородностей (полостей) в водной среде при работе установки.

3. Предложенное конструктивное решение водного поверхностного невзрывного сейсмоисточника с электромагнитным приводом позволяет работать при глубине водного слоя от 0,5 м, что исключает необходимость погружения сейсмоисточника. Предусмотренная возможность изменения режима работы электромеханической системы (от давления до удара по излучающей плите) обеспечивает повышение согласования с нагрузкой при учёте требования максимального КПД электромеханического преобразования.

4. Была установлена приемлемость работы электромагнита в предусмотренных режимах; экспериментально исследована силовая характеристика электромагнита; определена область параметров (значений зазоров и начальной энергии накопителя) СЭМИС, в которой от силового привода получается максимальная (и близкая к ней) механическая энергия; также было установлено, что этой области соответствуют максимальные (и близкие к ним) значения КПД электромеханического преобразования.

5. Показано соответствие выбранной схемы системы электропитания техническим требованиям и условиям. Выявлены схмотехнические возможности повышения эффективности заряда ёмкостного накопителя и надёжности схемы заряда.

6. Обоснованы особенности разработанного водного сейсмоисточника, обусловившие его экологичность и энергоэкономичность.

7. В ходе описания (с помощью механических схем и их электрических схем-аналогов) режимов работы электромеханической системы введено новое понятие "ключ заряда", расширяющее возможности применения метода электромеханических аналогий для механических систем в ударных режимах с изменяющимися связями между элементами.

8. С помощью аналитического анализа и математического моделирования представлено описание динамики различных режимов работы, позволившее сделать рекомендации по выбору некоторых параметров и определить возможности установки. В частности:

- исследование режима неупругого удара (п.п. 3.1.2) позволило определить, что оптимальным является соотношение масс (якоря, ударника, индуктора с пригрузом, излучающей плиты) при котором выполняется равенство

$$m_1 + m_3 = \sqrt{m_2 \cdot m_4}.$$

Рекомендовано исключение из конструкции излучающей плиты и снижение массы ударника;

- по результатам расчётов на математической модели сейсмоисточника установлено, что,

1) переход от режима давления к ударным режимам позволяет получить большую скорость движения якоря с ударником и, следовательно, увеличить мощность воздействия на среду;

2) в определённом диапазоне значений податливости упругой прокладки возможно получение фронта скорости излучателя, значительно более крутого, чем фронт скорости якоря с ударником. Это может быть использовано при оптимизации характеристик импульса воздействия на нагрузку.

9. Результаты сейсмических испытаний показали принципиальную возможность получения достаточного сейсмического сигнала при использовании водного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом.

Таким образом, проведёнными в ходе синтеза и анализа исследованиями, были достигнуты и изучены характеристики разработанной установки, потенциально повышающие эффективность и увеличивающие возможности водной сейсморазведки при использовании водного поверхностного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом.

Новизна предложенных решений предопределяет появление некоторых новых задач исследования (излучаемого сейсмического сигнала и его прохождения через различные среды; получение адекватной модели водной среды как нагрузки для сейсмоисточника и др.) и уже очевидных перспектив совершенствования сейсмоисточника (оптимизации конструктивной схемы; разработки наземно-водного варианта и др.).

Некоторые результаты данной работы могут быть использованы при проектировании наземных импульсных сейсмоисточников и других систем с электромагнитным линейным приводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федынский, В. В.** Разведочная геофизика [Текст] / В. В. Федынский. – М.: Недра, 1967. – 672 с.
2. Программа геолого-геофизических работ на акваториях Дальневосточных и Северо-Восточных морей Российской Федерации на ближнюю перспективу [Текст] : Разработана ГП "Трест Дальморгеофизика" ПО "Союзморгео". Согласована Министерством топлива и энергетики РФ и Министерством природных ресурсов РФ 14 апреля. – Южно-Сахалинск, 1999.
3. **Боганик, Г. Н.** Сейсмическая разведка [Текст] : учебник для вузов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. – 3-е изд., перераб. – М. : Недра, 1980. – 551 с.
4. Пневматический источник сейсмических сигналов [Текст] : пат. 2087925 Рос. Федерация / И. В. Паличев, В. А. Цапович. – № 93015422/25 ; заявл. 24.03.93 ; опубл. 20.08.97, Бюл. № 23. – 374 с.
5. Морской сейсмический источник [Текст] : а. с. 936708 СССР / В. А. Ежов, И. В. Паличев, В. И. Тюхалов, Н. И. Фодорчуков. – № 2877331/25 ; заявл. 29.12.79 ; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6. – 205 с.
6. Источник сейсмических сигналов [Текст] : а. с. 817631 СССР / В. А. Ежов, В. И. Тюхалов. – № 2768693/18–25 ; заявл. 18.05.79 ; опубл. 30.01.81, Бюл. № 12. – 188 с.
7. Источник сейсмических сигналов для акваторий [Текст] : а. с. 586726 СССР / опубл. 15.02.91, Бюл. № 6. – 205 с.
8. Устройство для возбуждения упругих колебаний в воде [Текст] : а. с. 811169 СССР / опубл. 07.03.81, Бюл. № 9. – 160 с.
9. **Кордик, В. Н.** Технические средства для возбуждения сейсмических сигналов в морской сейсморазведке [Текст] : Региональная и морская геофизика: Обзор / / В. Н. Кныш. – М. : ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ. ВИЭМС, 1990. – 55 с.
10. Научно-исследовательский и проектный институт геофизических методов разведки океана Океангеофизика [Электронный ресурс]. <http://www.oceangeo.ru/main.htm> (Отдел морской сейсморазведки. Сейсмоакустический комплекс высокого разрешения АКВАСВИП <http://www.oceangeo.ru/oms/omsniokrakvasvip.htm>)
11. Электромагнитный способ генерации и приёма звуковых колебаний [Текст] : а. с. 414000 СССР / Ю. И. Сазонов. – № 1748521/18–10; заявл. 14.11.72 ; опубл. 05.11.74, Бюл. № 5. – 25 с.
12. Импульсный электродинамический излучатель [Текст] : а. с. 355990 СССР / К. Л. Валиков, Р. А. Волченкова, В. И. Немченко, Н. А. Рой. – № 1489766/18–10 ; заявл. 05.11.70 ; опубл. 23.10.72, Бюл. № 32. – 17 с.
13. Источник возбуждения упругих волн [Текст] : а. с. 744399 СССР / В. А. Борисевич. – № 2487612/18–25 ; заявл. 23.05.77 ; опубл. 30.06.80, Бюл. № 24. – 177 с.
14. Устройство для возбуждения сейсмических сигналов [Текст] : а. с. 551582 СССР / С. И. Клипачев, Н. П. Лукьянов и В. Б. Сафронов. – № 2050162/25 ; заявл. 07.08.74 ; опубл. 22.04.77, Бюл. № 11. – 138 с.

15. Генератор ударных волн [Текст] : пат. 2027528 Рос. Федерация / Ю. В. Андриянов, О. Н. Андриянова, П. А. Беляев, А. И. Беляева, А. А. Ли. – № 5032136/10 ; заявл. 13.03.92 ; опубл. 27.01.95, Бюл. № 3. – 116 с.
16. Возбудитель акустических импульсов в жидкой среде [Текст] : а. с. 514257 СССР / С. И. Клипачёв, Н. П. Лукьянов. – № 2048962/10 ; заявл. 24.07.74 ; опубл. 15.05.76, Бюл. № 18. – 131 с.
17. Излучатель сейсмических сигналов для сейсморазведки на акваториях [Текст] : а. с. 921331 СССР / В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, А. Д. Немцев и В. Г. Пупышев. – № 2991506/18–25 ; заявл. 08.10.80 ; не подлежащий опубликованию в открытой печати.
18. Источник упругих колебаний [Текст] : а. с. 1311444 СССР / В. В. Ефросинин, В. В. Ивашин. – № 3911653/31–25 ; заявл. 17.06.85 ; не подлежащий опубликованию в открытой печати.
19. Источник упругих колебаний [Текст] : а. с. 1182896 СССР / В. В. Ефросинин, В. В. Ивашин, Н. П. Лукьянов, И. А. Милорадов, Н. М. Яковлев. – № 3697745/23–25 ; заявл. 08.02.84 ; не подлежащий опубликованию в открытой печати.
20. Marine vibration transducer [Текст] : Pat. 3329930 USA / Cole et al. Filed May 20, 1965, Appl. 457285.
21. Electrohydrosonic transducer [Текст] : Pat. 3349367 USA / Wisotsky. Filed Oct. 23, 1965, Appl. No. 505311.
22. Marine vibrator device: Pat. 3384868 USA / Brown et al. Filed Jan. 5, 1967, Appl. No. 607551.
23. Apparatus for the generation of acoustic signals in marine environments [Текст] : Pat. 4153135 USA / Vouyoucos. Filed Sep. 30, 1977, Appl. No. 838415.
24. Acoustic energy source [Текст] : Pat. 4974216 USA / Elliot. Filed Apr. 5, 1971, Appl. No. 131517.
25. Marine seismic source [Текст] : Pat. 5978316 USA / Ambs et al. Filed Sep. 29, 1997, Appl. No. 08/940088.
26. **Гелдарт, Л.** Сейсморазведка [Текст] : [пер. с англ] : в 2 т. / Л. Гелдарт, Р. Шерифф. – М. : Мир, 1987. – Т. 1. – 448 с. : ил.
27. **Анкушев, В. В.** Компания "ГЕОСЕЙС" представляет новый импульсный источник возбуждения "Геотон" [Текст] / В. В. Анкушев, С. В. Гурьев, В. И. Резвов // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. – 2003. – № 01(03). – С. 11–12.
28. **Смирнов, В. П.** Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда "Енисей СЭМ, КЭМ" [Текст] / В. П. Смирнов // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. – 2003. – № 01(03). – С. 21–25.
29. **Анкушев, В. В.** Импульсный санный электромагнитный сейсмоисточник "Геотон": особенности выбора основных силовых параметров, конструкция и применение [Текст] / В. В. Анкушев, С. В. Гурьев, В. И. Резвов // Геофизика / Научно-технический журнал Евро-азиатского геофизического общества. – 2004. – Специальный выпуск. – С. 120–123.

30. Приборы и системы разведочной геофизики [Текст] : (спецвыпуск об электромагнитных источниках "Енисей"). / Ежеквартальное издание саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. – 2005. – № 02.

31. **Иванников, Н. А.** Импульсные электромагнитные сейсмоисточники: особенности и перспективы совершенствования [Текст] / Н. А. Иванников, В. В. Ивашин // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. – 2005. – № 02. – С. 9 – 13.

32. Импульсный невзрывной сейсмоисточник с электромагнитным приводом [Текст] : пат. 2171478 Рос. Федерация / В. А. Детков, В. В. Ивашин, В. П. Певчев. – № 2000104235/28 ; заявл. 23.02.00 ; опубл. 27.07.01, Бюл. № 21. – 332 с.

33. Электромагнитный источник сейсмических волн [Текст] : пат. 2216753 Рос. Федерация / Н. А. Иванников, В. И. Резвов. – № 2001135421/28 ; заявл. 28.12.01 ; опубл. 20.11.03, Бюл. № 32. – 569 с.

34. Невзрывной сейсмоисточник с электромагнитным приводом [Текст] : пат. 2242027 Рос. Федерация : МПК7 G 01 V 1/155 / Н. А. Иванников, В. В. Ивашин, А. Н. Трохачёв, Д. А. Яковлев. – № 2003130012/28 ; заявл. 09.10.03 ; опубл. 10.12.04, Бюл. № 34. – 1016 с. : ил.

35. **Гурьев, С. В.** Водный источник сейсмических колебаний с импульсным электромагнитным приводом [Текст] / С. В. Гурьев, Н. А. Иванников, В. В. Ивашин, В. И. Резвов, Д. А. Яковлев // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. – 2005. – № 1. – С. 34–35. – Библиогр.: 4 назв. – 500 экз.

36. Сейсмоисточник для создания сейсмических волн на акваториях [Текст] : пат. 2231087 Рос. Федерация : МПК7 G 01 V 1/155, G 01 V 1/38 / Н. А. Иванников, В. В. Ивашин, Д. А. Яковлев. – № 2003124706/28 ; заявл. 07.08.03 ; опубл. 20.06.04, Бюл. № 17. – 571 с. : ил.

37. **Угаров, Г. Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.09.01 / Угаров Геннадий Григорьевич. – СО РАН Институт горного дела. – Новосибирск, 1992. – 492 с.

38. **Ивашин, В. В.** Импульсный электромагнитный привод источника сейсмических колебаний [Текст] / В. В. Ивашин // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. Ч. 2. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2003. – № 5 (25). – 358 с.

39. **Блудов, А. И.** Быстродействующий возвратно-поступательный механизм с электромагнитным ускорением и торможением якоря: [Текст] / А. И. Блудов, А. М. Еленкин, В. В. Ивашин // П.Т.Э. – 1973. – № 4.

40. Электрический двигатель возвратно-поступательного движения [Текст] : а. с. 686126 СССР / В. В. Ивашин. – № 2082382/24–07 ; заявл. 12.12.74 ; опубл. 15.08.79, Бюл. № 34. – 227 с.

41. Электрический двигатель возвратно-поступательного движения [Текст] : а. с. 799085 СССР / В. В. Ивашин, Л. И. Карковский. – № 2507989/24–07 ; заявл. 13.07.77 ; опубл. 23.01.81, Бюл. № 3. – 255 с.

42. Электрический двигатель возвратно-поступательного движения [Текст] : а. с. 877728 СССР / В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, Ю. П. Петунин. – № 2880346/24–07 ; заявл. 11.02.80 ; опубл. 30.10.81, Бюл. № 40. – 277 с.
43. Источник сейсмических сигналов [Текст] : а. с. 721789 СССР / В. В. Ивашин, И. М. Чуркин. – № 2068543/18–25 ; заявл. 22.10.74 ; опубл. 15.03.80, Бюл. № 10. – 181 с.
44. Источник сейсмических сигналов (его варианты) [Текст] : а. с. 1163290 СССР / Б. Г. Ваншельбойм, В. В. Ивашин, В. В. Кушнарёв, И. А. Милорадов, М. Б. Шнеерсон. – № 3636817/24–25 ; заявл. 25.08.83 ; опубл. 23.06.85, Бюл. № 23. – 184 с.
45. Источник сейсмических сигналов [Текст] : а. с. 798663 СССР / В. В. Ивашин, И. М. Чуркин. – № 2716606/18–25 ; заявл. 25.01.79 ; опубл. 23.01.81, Бюл. № 3. – 165 с.
46. **Ивашин, В. В.** Индукционно-динамический тормоз для ударного стенда [Текст] / В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, С. Б. Плотников // Электрические импульсные системы (Материалы III Всесоюзного совещания по проблемам "Силовые импульсные системы"). – Новосибирск : Институт горного дела СО АН СССР, 1976. – С. 82–87.
47. Быстродействующий индукционно-динамический пневматический клапан [Текст] : а. с. 769168 СССР / В. А. Ашихмин, В. В. Ивашин, С. Б. Плотников. – № 2697267/25–08 ; заявл. 14.12.78 ; опубл. 07.10.80, Бюл. № 37. – 163 с.
48. Устройство ударного действия для образования скважин в грунте путём его уплотнения [Текст] : а. с. 802467 СССР / Л. М. Борозенец, В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, С. И. Орешников, Ю. П. Петунин. – № 2731542/29–03 ; заявл. 01.03.79 ; опубл. 07.02.81, Бюл. № 5. – 115 с.
49. Импульсно-вибрационный возбудитель сейсмических колебаний [Текст] : отчёт о НИР / ВИНТИ ; рук. Ивашин В. В. ; исполн.: Чуркин И. М. [и др.]. – М. – № ГР 72000080.
50. **Еленикин, А. М.** Индукционно-динамический двигатель возвратно-поступательного движения с большим тяговым усилием [Текст] / А. М. Еленкин, В. В. Ивашин, И. М. Чуркин // Силовые импульсные системы: Сборник статей. Ч. 1. – ВИНТИ. – 1975. – Новосибирск : СО АН СССР. – 1973. – № 7452-73. – С. 88–89.
51. Разработка импульсного и вибрационного источников на базе индукционно-динамических двигателей [Текст] : отчёт о НИР / Фонды НПО "Южморгео"; Ивашин В. В., Кострыгин Ю. П., Молоканов Г. И., Чуркин И. М. [и др.]. – Краснодар, 1974.
52. **Ивашин, В.В.** Влияние форсировки магнитного поля короткоходового электромагнита на его быстродействие и к.п.д. преобразования энергии [Текст] / В. В. Ивашин // Изв. вузов "Электромеханика". – 1986. – № 2. – С.103–108.
53. Электромагнит [Текст] : а. с. 1580443 СССР / В. В. Ивашин, В. П. Певчев. – № 4345033/24–07 ; заявл. 17.12.87 ; опубл. 23.07.90, Бюл. № 27. – 244 с.
54. Электромагнит [Текст]: а. с. 1390647 СССР / В. В. Ивашин, В. П. Певчев. – № 3991931/24-07 ; заявл. 10.11.85 ; опубл. 23.04.88, Бюл. № 15. – 215 с.

55. Импульсный электромагнитный привод невзрывного сейсмоисточника [Текст] : пат. 2172496 Рос. Федерация / В. В. Ивашин, В. П. Певчев. – № 2000104236/28 ; заявл. 23.02.00 ; опубл. 20.08.01, Бюл. № 23. – 415 с.

56. Силовой электромагнит импульсного невзрывного сейсмоисточника [Текст] : пат. 2172497 Рос. Федерация / В. В. Ивашин, В. П. Певчев. – № 2000104237/28 ; заявл. 23.02.00 ; опубл. 20.08.01, Бюл. № 23. – 415 с.

57. **Ивашин, В. В.** Уменьшение механической энергии импульсного броневоего электромагнита с притягивающимся якорем из-за неравномерности рабочего зазора [Текст] / В. В. Ивашин, В. П. Певчев ; Информэлектро. – М., 1988. – № 2. – Деп. в Информэлектро № 958-ЭТ.

58. **Ивашин, В. В.** Фронт силы электромагнитного привода сейсмоисточников [Текст] / В. В. Ивашин, Д. А. Яковлев // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сб. тр. Всероссийской научно-технической конф., 21–24 сент. 2004 г. Ч. 2. – Тольятти, 2004. – С. 74–77. – Библиогр.: 6 назв. – 100 экз.

59. **Ивашин, В. В.** Обоснование инженерного расчета электромагнитов с повышенной энергетической эффективностью сейсмоисточников [Текст] / В. В. Ивашин, Л. И. Карковский, С. В. Поносов // Вестник УГТУ-УПИ : Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. Ч. 2. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – № 5 (25). – 358 с.

60. **Поносов, С. В.** Особенности энергопреобразования импульсного электромагнитного двигателя [Текст] / С. В. Поносов, А. Н. Трохачёв, Д. А. Яковлев // Наука – производству. – 2004. – № 4. – С. 40–43. – 500 экз.

61. **Бердинский, Г. С.** Зарядные устройства емкостных накопителей энергии [Текст] / Г. С. Бердинский, И. М. Чиженко. – Киев : Наук. думка, 1980. – 150 с.

62. **Кныш, В. А.** Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов [Текст] / В. А. Кныш. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 160 с.

63. **Пентегов, И. В.** Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии [Текст] / И. В. Пентегов. – Киев : Наук. думка, 1982. – 424 с.

64. **Булатов, О. Г.** Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии [Текст] / О. Г. Булатов, В. С. Иванов, Д. И. Панфилов. – М. : Радио и связь, 1986. – 160 с.

65. **Иванников, Н. А.** Совершенствование индукционно-динамических двигателей для кодоимпульсных сейсмоисточников [Текст] : дис. ...канд. техн. наук : 05.09.01 / Иванников Николай Александрович. – ТолПИ. – Тольятти, 1984. – 225 с.

66. **Пентегов, И. В.** Исследование переходных процессов при зарядке батареи конденсаторов с помощью выпрямителя, собранного по схеме Латура [Текст] / И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский // Проблемы технической электродинамики. – 1970. – вып. 24. – С. 107 – 111.

67. **Шнеерсон, М. Б.** Теория и практика наземной сейсморазведки [Текст] / под ред. М. Б. Шнеерсона. – М. : ОАО "Издательство "Недра", 1998. – 527 с.

68. ООО Фирма "Геосейс": Сейсмоисточник GEOTON [Электронный ресурс]. www.geoton.ru (Лицензии <http://www.geoton.ru/1/license.php>)

69. **Максимова, М. П.** Оценка влияния пневмоисточников при морской геофизической разведке на морскую фауну [Текст] / М. П. Максимова, М. В. Цыганова, А. А. Шамшин // Экологические системы и приборы. – 2001. – № 5. – С. 48–57.
70. **Максимова, М. П.** Охрана морей при проведении геофизических работ на шельфе [Текст] / М. П. Максимова, М. В. Цыганова, А. А. Шамшин // Экологические системы и приборы. – 2001. – № 5. – С. 41–47.
71. **Яковлев, Д. А.** Экологически чистые и энергоэкономичные источники сейсмических колебаний для сейморазведочных работ на акваториях [Текст] / Д. А. Яковлев // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сб. тр. Второй международной научно-тех. конф., 22–25 сент. 2005 г. – Тольятти, 2005. – С. 243–246. – Библиогр.: 9 назв.
72. **Пейн, Г.** Физика колебаний и волн [Текст] / Г. Пейн ; перевод с англ. А. Л. Колоколова. – М. : Мир, 1979. – 389 с.
73. **Свердлин, Г. М.** Прикладная гидроакустика [Текст] / Г. М. Свердлин. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1984. – 277 с.
74. **Лайтхилл, Д.** Волны в жидкостях [Текст] / Джеймс Лайтхилл ; пер с англ. под ред. П.П. Корявова, П. И. Чушкина. – М. : Мир, 1981. – 598 с.
75. **Скучик, Е.** Основы акустики [Текст] : в 2 т. / Е. Скучик ; пер. с англ. – М. : Мир, – 1976.
76. **Камп, Л.** Подводная акустика [Текст] / Л. Камп ; пер. с англ. М. М. Кригер, под ред. С. Н. Ржевкина. – М. : Мир, 1972. – 328 с.
77. **Харкевич, А. А.** Избранные труды [Текст]. В 3 т. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. / А. А. Харкевич. — М. : Наука, 1973. – 399 с.
78. **Горшков, А. Г.** Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение) [Текст] / А. Г. Горшков, Э. И. Григолюк. – Л. : Судостроение, 1976. – 199 с.
79. **Гамбурцев, Г. А.** О составлении электромеханических аналогий [Текст] / Г. А. Гамбурцев // Доклады академии наук. – 1935. – № 8–9. – С. 303–306.
80. **Харкевич А. А.** Электромеханические аналогии [Текст] / А. А. Харкевич // Журнал технической физики. – 1931. – т. 1, вып. 1–1.
81. **Тетельбаум, И. М.** Электрическое моделирование динамики электропривода механизмов [Текст] /И. М. Тетельбаум, Ф. М. Шлыков. – М. : Энергия, 1970. – 191 с.
82. **Дружинский, И. А.** Механические цепи [Текст] / И. А. Шлыков. – Л. : Машиностроение, 1977. – 238 с.
83. **Ивашин, В. В.** Построение электрических цепей-аналогов механической системы источника сейсмических колебаний [Текст] / В. В. Ивашин, И. А. Милорадов, В. Г. Пупышев // Электромагнитные силовые импульсные системы. : - Сб. науч. трудов Института горного дела СО АН СССР., Новосибирск. – 1982. – С. 148–157.
84. **Ивашин, В. В.** Электромеханические аналогии [Текст] / В. В. Ивашин. – Куйбышев. : КуАИ, 1983. – 70 с.
85. **Ленк, А.** Электромеханические системы [Текст] / А. Ленк ; перевод под ред. Н. В. Петькина. – М. : Мир, 1978. – 283 с.

86. **Ивашин, В. В.** Динамика импульсного невзрывного сейсмоисточника [Текст] / В. В. Ивашин, А. Н. Трохачёв, Д. А. Яковлев // Наука – производству. – 2004. – № 4. – С. 35–37. – 500 экз.

87. **Певчев, В. П.** Исследования импульсного электромагнитного поверхностного водного сейсмоисточника [Текст] / В. П. Певчев, А. Н. Трохачёв, Д. А. Яковлев // Наука – производству. – 2004. – № 4. – С. 38–39. – 500 экз.

88. **Демирчан, К. С.** Теоретические основы электротехники [Текст] : в 2 т. Т.1 ; учебник для вузов / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман. – Л. : Энергоиздат. Ленигр. отд-ние, 1981. – 536 с.

89. Способ определения деформации грунта излучающей плитой-антенной импульсного сейсмоисточника с электромагнитным приводом [Текст] : пат. 2265234 Рос. Федерация / Н. А. Иванников, В. В. Ивашин. – № 2005101176/28 ; заявл. 19.01.05 ; опубл. 27.11.05, Бюл. № 33. – 244 с.

90. **Аленицын, А. Г.** Краткий физико-математический справочник [Текст] / А. Г. Аленицын, Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 368 с.

91. Сейсмоисточник для создания сейсмических волн на акваториях [Текст] : пат. 2246741 Рос. Федерация : МПК7 G 01 V 1/38 / Н. А. Иванников, В. В. Ивашин, Г. В. Милорадова, Д. А. Яковлев. – № 2004107064/28 ; заявл. 09.03.04 ; опубл. 20.02.05, Бюл. № 5. – 662 с. : ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт внедрения НИР(ОКР)

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО "СОЛДИГЕН-
Технологии"


Соловьёв Д.Г.
"17" марта 2006 г.


УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Тольяттинского
государственного университета
доктор ф.-м. наук, профессор


Кристал М.М.
"27" марта 2006 г.


АКТ

Внедрения хозяйственной темы НИР(ОКР) № 06204 "Невзрывные электромеханические сейсмоисточники: разработка, изготовление и лабораторные исследования", п. 1.1. "Разработка и изготовление водного источника сейсмических сигналов "Аква".

"17" марта 2006 г. комиссия в составе представителей Заказчика: Генеральный директор Соловьёв Д.Г., инженер Смертин С.Г. и представителей Тольяттинского государственного университета (Исполнителя): руководитель НИЛ-6 гл.н.с., д.т.н., профессор Ивашин В.В.; с.н.с., к.т.н. Иванников Н.А.; м.н.с. Яковлев Д.А.

Составили настоящий акт в том, что в ООО "СОЛДИГЕН-Технологии" при участии Департамента научного развития ОАО "Тюменнефтегеофизика" внедрён опытный образец водного источника сейсмических сигналов "Аква", включая систему питания.

Целью исследований по данной теме являлись разработка, создание и экспериментальное исследование опытного образца водного поверхностного сейсмоисточника с импульсным электромагнитным приводом, более простого, экономичного, имеющего возможность работы на мелководье, в отличие от широко использующихся в настоящее время водных сейсмоисточников - пневмопушек.

1. В процессе внедрения выполнены следующие работы:

- 1.1. Разработана конструктивная схема сейсмоисточника, позволяющая осуществлять работу электромеханической системы в различных режимах. Проведены оценочные расчёты, описывающие работу сейсмоисточника. Выполнен расчёт электромагнитного привода.
- 1.2. Изготовлен водный сейсмоисточник и его схема питания.
- 1.3. Проведены лабораторные испытания сейсмоисточника.
- 1.4. Совместно с ОАО "Саратовнефтегеофизика" проведены сейсмические испытания сейсмоисточника.

2. Технические характеристики опытно-промышленной проверки внедрения:

2.1. При проведении лабораторных испытаний сейсмоисточника установлено соответствие его выходных характеристик техническому заданию:

Характеристика	Значение характеристик
1. Номинальное создаваемое электромагнитом усилие	$25 \cdot 10^4$ Н.
2. Масса пригруза	1300 кг.
3. Диаметр плиты-излучателя	0,8 м.
4. Зазор в электромагните	$(4..10) \cdot 10^{-3}$ м.
5. Зазор между ударником и плитой-излучателем	$(0..8) \cdot 10^{-3}$ м.
6. Масса сейсмоисточника (без плавсредства)	2500 кг.
7. Минимальный период повторения циклов работы	3 с.
8. Средняя потребляемая мощность	700 Вт.
9. Режимы работы:	а – упругий удар; б – упругое давление.

2.2. При проведении сейсмических испытаний установлено наличие приемлемого сейсмического эффекта и подтверждена возможность работы на малых глубинах.

3. Работы выполнены в полном соответствии с техническим заданием.

4. Заключение. Работу по внедрению считать законченной полностью. Рекомендовать дальнейшие НИР по:

- сейсмическим испытаниям сейсмоисточника на участке профиля;
- исследованию излучаемого сейсмического сигнала в различных режимах работы;
- проектированию импульсного электромагнитного сейсмоисточника, способного работать в транзитных зонах как на воде, так и на суше.

Представители предприятия



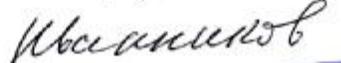


Соловьёв Д.Г.

Смертин С.Г.

Представители Тольяттского государственного университета







Ивашин В.В.

Иванников Н.А.

Яковлев Д.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт внедрения в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Боньяттинского
государственного университета
д.ф.н.-м.н., профессор

 М.М. Криштал

" 23 " марта 2006 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс
результатов диссертационной работы
Яковлева Дмитрия Алексеевича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Яковлева Д.А. "Силовая электромагнитная импульсная система для возбуждения сейсмических волн в водной среде" используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 200400 "Промышленная электроника" в курсе лекций "Импульсные электромеханические преобразователи энергии", а также в дипломном проектировании.

Заведующий кафедрой
"Промышленная электроника"
кандидат техн. наук, доцент



Швцов А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Конструкция сейсмоисточника "Аква"

Описание конструкции (по рис. ПЗ.1)

Индуктор 1 электромагнита, скрепленный с двумя дисками пригрузов 2, 3 с общей массой 1500 кг, лежит на заплечиках четырех стоек 4, жестко установленных на основании 5. В пазах индуктора уложена обмотка, выходные концы которой соединены через контакты на панели 6 с кабелем 7 длиной не менее пяти метров. Якорь 8 электромагнита лежит на заплечиках четырех стоек 9, жестко соединенных с бойком 10. Индуктор и якорь электромагнита центрированы между собой парой втулок, одна из которых 11 соединена с ударным бойком 10, а другая 12 – с пригрузом 3.

Боек 10 фиксирован в верхнем положении четырьмя упорами 13, закрепленными на основании 5. В нижней части основания 5 с помощью кольца 18 и 36-тью болтов 19 закреплена эластичная мембрана 17. Излучающая плита 20 вывешена на четырех пружинах 21 между стаканами 22 и планками 23, закрепленными на основании 5 таким образом, чтобы плита прижималась к планкам 23.

Стойки 4 в верхней части соединены кольцом 24, а стойки 9 – пластиной 25. На кольце 24 установлены четыре стойки 26, на которых закреплена крышка 27. Между кольцом 24 и крышкой 27 надевается защитный кожух в форме хомута 28, лента которого стянута болтовым соединением. На стойках 4 предусмотрены четыре грузовые гайки 29.

Зазор между индуктором и якорем электромагнита ($A=10\text{мм}$) устанавливается с помощью прокладок 30. Основание 5 фиксировано на переходном кольце 31 через два кольцевых уплотнения 32.

При подаче импульса тока в обмотку электромагнита якорь и индуктор притягиваются друг к другу. При этом якорь через стойки 9 и боек 10 совершают удар через прокладку 33 по излучающей плите 20, которая через мембрану 17 передает силовой импульс в воду.

После выбора рабочего зазора индуктор и якорь двигаются вверх с замедлением и после остановки возвращаются в исходное положение под действием силы тяжести соответственно на заплечики стоек 4 и 9. Боек 10 опирается на упор 13 и удерживается пружиной 14, а излучающая плита 20 – пружиной 21 до упора 23.

В исходном положении величина зазора между индуктором и якорем электромагнита $A = 10\text{мм}$, а между бойком 10 и излучающей плитой (20) – $B = 8\text{мм}$.

Основные габаритные и установочные размеры показаны на рис. ПЗ.1.

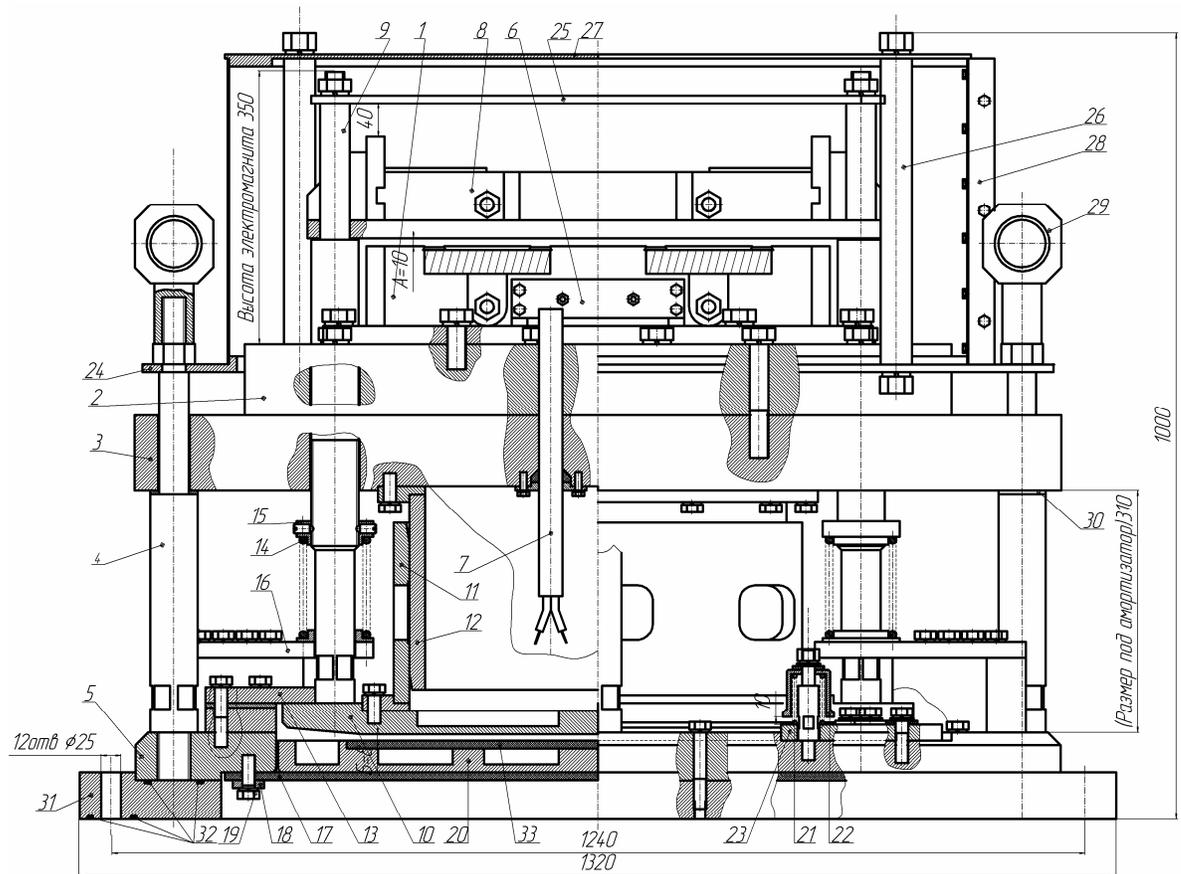


Рис. П1.1. Общий вид сейсмоисточника АКВА

(1 - индуктор электромагнита; 2,3 - плиты пригрузки; 4 - стойка; 5 - основание; 6 - кабель; 7 - панель контактная; 8 - ярлык электромагнита; 9 - стойка; 10 - боек; 11, 12 - скользящая пара втулок; 13 - упор; 14 - пружина; 15 - гайка; 16 - планка; 17 - мембрана; 18 - кольца; 19 - болт; 20 - плита излучающая; 21 - пружина; 22 - стакан; 23 - планка; 24 - кольцо; 25 - пластина; 26 - стойка; 27 - крышка; 28 - хомут; 29 - гайка грузовая; 30 - прокладка; 31 - кольца переходные; 32 - уплотнения; 33 - прокладка)



Рис. П3.2. Сейсмоисточник "Аква" (фото).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Листинг программы для расчёта процессов в механической системе водного сейсмоисточника

Расчёт математической модели механической цепи сейсмоисточника Аква

Исходные данные для механической цепи:

Массы элементов:

<p>Якорь: $m_1 := 200$</p> <p>Индуктор с пригрузом: $m_2 := 260 + 1300$ $m_2 = 1560$</p>	<p>Ударник: $m_3 := 14.4 + 96 + 72$ $m_3 = 224$</p> <p>Плита: $m_4 := 65 + 13$ $m_4 = 78$</p>
--	---

Силы тяжести: $g := 9.8$

$P_{g1} := m_1 \cdot g$ $P_{g2} := m_2 \cdot g$ $P_{g3} := m_3 \cdot g$ $P_{g4} := m_4 \cdot g$

Зазоры:

В электромагните: $\delta_1 := 0.005$

Разбег ударника: $\delta_2 := 0.0$

Податливости:

Податливость пружины: $\xi_{II} := 2.5 \cdot 10^{-5}$ $rem_{\xi_{II}} := 2.5 \cdot 10^{-5}$

Податливость прокладки излучателя $\xi_{34} := 10^{-12}$ $rem_{\xi_{34}} := 4 \cdot 10^{-8}$

Податливость - модель нагрузки: $\xi_3 := 10^{-15}$ $rem_{\xi_3} := 5 \cdot 10^{-10}$

Электромагнитная сила:

$P_{\mathcal{E}} := 25 \cdot 10^4$

Соответствующие исходные данные для электрической цепи:

<u>Индуктивности:</u>	<u>Ёмкости:</u>	<u>ЭДС:</u>
$L_1 := m_1$	$C_{II} := \xi_{II}$	$E_m := P_{\mathcal{E}}$
$L_2 := m_2$	$C_{34} := \xi_{34}$	$E_1 := P_{g1}$
$L_3 := m_3$	$C_3 := \xi_3$	$E_2 := P_{g2}$
$L_4 := m_4$		$E_3 := P_{g3}$
		$E_4 := P_{g4}$

Начальные условия:

$U_{cп0} := E_1 + E_3$ $i_{L0} := 0$

$U_{cз0} := E_4$

$$x_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{cп0} \\ 0 \\ U_{cз0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad x_4 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{cп0} \\ 0 \\ U_{cз0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Системы дифференциальных уравнений для разных интервалов

$$\begin{array}{l}
 D1(t, x1) := \left(\begin{array}{l}
 \frac{E1 + E3 + Em - x1_4}{L1 + L3} \\
 \frac{E2 - Em}{L2} \\
 E1 + E3 + Em - x1_4 \\
 L1 + L3 \\
 0 \\
 \frac{x1_0}{C\pi} \\
 0 \\
 0 \\
 x1_0 \\
 x1_1 \\
 x1_2 \\
 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 D2(t, x2) := \left(\begin{array}{l}
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 E3 - x2_4 \\
 L3 \\
 E4 - x2_6 \\
 L4 \\
 \frac{x2_2}{C\pi} \\
 0 \\
 \frac{x2_3}{C3} \\
 x2_0 \\
 x2_1 \\
 x2_2 \\
 x2_3
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 D3(t, x3) := \left(\begin{array}{l}
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 \frac{E3 - x3_5 - x3_4}{L3} \\
 E4 + x3_5 - x3_6 \\
 L4 \\
 \frac{x3_2}{C\pi} \\
 \frac{x3_2 - x3_3}{C34} \\
 \frac{x3_3}{C3} \\
 x3_0 \\
 x3_1 \\
 x3_2 \\
 x3_3
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 D4(t, x4) := \left(\begin{array}{l}
 \frac{E1 + E3 + Em - x4_5 - x4_4}{L1 + L3} \\
 \frac{E2 - Em}{L2} \\
 E1 + E3 + Em - x4_5 - x4_4 \\
 L1 + L3 \\
 E4 + x4_5 - x4_6 \\
 L4 \\
 \frac{x4_0}{C\pi} \\
 \frac{x4_0 - x4_3}{C34} \\
 \frac{x4_3}{C3} \\
 x4_0 \\
 x4_1 \\
 x4_2 \\
 x4_3
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 D5(t, x5) := \left(\begin{array}{l}
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 \frac{E1 + E2}{L1 + L2} \\
 E3 - x5_4 \\
 L3 \\
 E4 - x5_6 \\
 L4 \\
 \frac{x5_2}{C\pi} \\
 0 \\
 \frac{x5_3}{C3} \\
 x5_0 \\
 x5_1 \\
 x5_2 \\
 x5_3
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

N4 := 1000 N5 := 1000 N3 := 1000 N1 := 1000 N6 := 1000 N2 := 1000
 t4 := 0.01 t5 := 0.01 t3 := 0.01 t1 := 0.01 t6 := 0.01 t2 := 0.01

Расчётный модуль

```

Process := if  $\delta_2 = 0$ 
  "way 0 - 4 - ?"
  Res4 ← Rkadapt(x4, 0, t4, N4, D4)
  for strok4 ∈ 1..N4
    if  $(|Res4_{strok4, 10}| - |Res4_{strok4, 11}| - \delta_2) \leq -5$ 
      "way 0 - 4 - 1(6)"
      Res4 ← submatrix(Res4, 0, strok4, 0, 11)
      x6 ← submatrix(Res4, strok4, strok4, 1, 11)T
      Res6 ← Rkadapt(x6, Res4strok4, 0, Res4strok4, 0 + t6, N6, D1)
      t46 ← Res4strok4, 0
      Res ← stack(Res4, Res6)
      way ← 046
      Res
      way
      t46
      break
    otherwise
      "way 0 - 4 - 3 - 5"
      if  $(|Res4_{strok4, 8}| + |Res4_{strok4, 9}|) \geq \delta_1$ 
        Res4 ← submatrix(Res4, 0, strok4, 0, 11)
        x3 ← submatrix(Res4, strok4, strok4, 1, 11)T
        
$$x3_0 \leftarrow \frac{L1 \cdot Res4_{strok4, 1} + L2 \cdot Res4_{strok4, 2}}{L1 + L2}$$

        
$$x3_1 \leftarrow \frac{L1 \cdot Res4_{strok4, 1} + L2 \cdot Res4_{strok4, 2}}{L1 + L2}$$

        Res3 ← Rkadapt(x3, Res4strok4, 0, Res4strok4, 0 + t3, N3, D3)
        for strok3 ∈ 1..N3
          if  $(|Res3_{strok3, 10}| - |Res3_{strok3, 11}| - \delta_2) \leq 0$ 
            Res3 ← submatrix(Res3, 0, strok3, 0, 11)
            Res3strok3, 3 ← 0
            x5 ← submatrix(Res3, strok3, strok3, 1, 11)T
            Res5 ← Rkadapt(x5, Res3strok3, 0, Res3strok3, 0 + t5, N5, D2)
            Res ← stack(stack(Res4, Res3), Res5)
            way ← 0435
            Res
            way
            break
          otherwise
  
```



```

Res
way
t35
break
otherwise
Res ← stack(stack(Res1, Res4), Res3)
way ← 0143
break
break
otherwise
"way 0 - 1 - 2 - 3 "
if (|Res1_strok1,8| + |Res1_strok1,9|) ≥ δ1
Res1 ← submatrix(Res1,0, strok1,0,11)
x2 ← submatrix(Res1, strok1, strok1,1,11)T
x20 ←  $\frac{L1 \cdot Res1_{strok1,1} + L2 \cdot Res1_{strok1,2}}{L1 + L2}$ 
x21 ←  $\frac{L1 \cdot Res1_{strok1,1} + L2 \cdot Res1_{strok1,2}}{L1 + L2}$ 
Res2 ← Rkadapt(x2, Res1_strok1,0, Res1_strok1,0 + t2, N2, D2)
for strok2 ∈ 1..N2
if |Res2_strok2,10| ≥ δ2
Res2 ← submatrix(Res2,0, strok2,0,11)
x3 ← submatrix(Res2, strok2, strok2,1,11)T
Res3 ← Rkadapt(x3, Res2_strok2,0, Res2_strok2,0 + t3, N3, D3)
for strok3 ∈ 1..N3
if (|Res3_strok3,10| - |Res3_strok3,11| - δ2) ≤ 0
Res3 ← submatrix(Res3,0, strok3,0,11)
x5 ← submatrix(Res3, strok3, strok3,1,11)T
Res5 ← Rkadapt(x5, Res3_strok3,0, Res3_strok3,0 + t5, N5, D5)
Res ← stack(stack(stack(Res1, Res2), Res3), Res5)
way ← 01235
Res
way
break
otherwise
Res ← stack(stack(Res1, Res2), Res3)
way ← 0123
break
break
Res

```

Запись результатов расчётов в файл

WRTEPRN("D:\Akvadrom\Mathcad\xx5_0_12.prn") := Process

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СЕЙСМОИСТОЧНИКА "АКВА"

1. Исследование в режиме заторможенного якоря.

1.1. *Определение зависимостей максимального тока обмотки и максимального потока полюса электромагнита от величины напряжения на емкостном накопителе $I_m = f(U_C)$ и $F = f(U_C)$ на основе временных осциллограмм указанных величин.*

1.2. *Снятие зависимостей (п.п. 1.1.) при разной величине магнитного зазора.*

1.3. *Обработка экспериментальных данных.*

Перевод измеренных напряжений (пропорциональных току и потоку) в единицы измерения тока (А) и потока (Вб).

Расчёт индукции в зазоре (В) и силы электромагнита (Р) по экспериментальным данным.

Построение графиков зависимостей $I_m(W_C)$, $F(W_C)$, $B(W_C)$ и $P(W_C)$ для разной величины магнитного зазора.

2. Исследование режима давления в исходной конструкции.

2.1. *Снятие осциллограмм: перемещений ударника и плиты относительно основания $X_{У-О}$, $X_{П-О}$; тока обмотки и потока полюса электромагнита (I и F) при разных напряжениях на емкостном накопителе.*

2.2. *Снятие зависимостей (п.п. 2.1.) при разной величине зазора в электромагните.*

2.3. *Снятие зависимости амплитуды отклика сейсмоприёмника от задаваемых параметров и режимов работы.*

2.4. *Обработка экспериментальных данных.*

Определение влияния параметров и режимов работы на быстроту выбора зазора.

Расчёт площадей энергетических диаграмм.

3. Исследование ударного режима.

3.1. *Снятие экспериментальных данных.*

Исследование режима производится аналогично пунктам 2.1 – 2.3 настоящей программы. Дополнительно проводится снятие зависимостей по п.п. 2.1, 2.2 при разной величине разгона ударника ("механического" зазора).

3.2. *Обработка экспериментальных данных.*

Аналогично п.п. 2.4. настоящей программы