

ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЩИТНИКОВ Александр Александрович

ПЕРЕДАЧА СООБЩЕНИЙ ЧЕРЕЗ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ СЕЙСМИЧЕСКИМИ
ВОЛНАМИ

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Шайдунов Г.Я.

Красноярск 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Анализ состояния и выбор направления исследований	12
1.1 Радиоволновые шахтные системы связи	12
1.1.1 Излучающий кабель	12
1.1.2 Шахтный комплекс аварийной связи	14
1.1.3 Зарубежный опыт	17
1.2 Гидроакустические системы связи	20
1.3 Сейсмические системы связи	22
1.4 Выбор направления исследования	24
ГЛАВА 2 Проблема передачи сообщений сейсмическим каналом связи	25
2.1 Виды сейсмических волн и способы их возбуждения	25
2.2 Энергетический расчёт сейсмического канала	27
2.2.1 Основные параметры и характеристики для расчёта сейсмического канала	28
2.2.2 Расчет ослабления сигнала в среде	29
2.2.3 Расчет ослабления сигнала в типовой модели	34
2.2.4 Расчет параметров линейной группы приемников	36
2.3 Разработка протокола передачи данных	39
2.3.1 Модуляция сообщения	39
2.3.2 Демодуляция ОФМ-сигнала	42
2.3.3 Корреляционная обработка сигнала	43
2.4 Компьютерная модель сейсмоакустической системы	48
ГЛАВА 3 Проблемы аппаратной реализации	51
3.1 Электромеханический привод передатчика	51
3.1.1 Обоснование выбора и метод расчета излучателя сейсмических волн	51
3.1.2 Расчет экспериментального излучателя сейсмических волн .	65
3.2 Источник питания. Зарядное устройство и преобразователь напряжения.	68
3.2.1 Обоснование выбора схемы заряда силового конденсатора ..	69
3.2.2 Принцип работы и определение временных закономерностей обратноходового преобразователя	77
3.2.3 Методы сокращения времени заряда емкостного накопителя энергии и повышения КПД преобразователя	79
3.2.4 Расчет основных параметров преобразователя напряжения .	83
3.3 Приемник	84
3.3.1 Входной усилитель	84

3.3.2	Цифровая обработка сигнала	87
ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования и перспективы совершенствования		90
4.1	Экспериментальные работы в угольной шахте «СУЭК-Кузбасс», П/Е «Шахта Комсомолец»	91
4.1.1	Результаты испытаний на горизонте «-400м» , ствол №1	92
4.1.2	Результаты испытаний на горизонте «-240 м», ствол №2	94
4.1.3	Общий анализ результатов испытаний и рекомендаций в угольной шахте СУЭК Кузбасс.....	97
4.2	Экспериментальные работы в рудной шахте «Абаканский рудник»	98
4.2.1	Результаты испытаний на горизонте «537 м», глубина – 50 м.	99
4.2.2	Результаты испытаний на горизонте «145 м», глубина - 450 метров	102
4.2.3	Общий анализ результатов испытаний в рудной шахте "Абаканский рудник"	103
4.3	Экспериментальные работы на Минусинском учебно-испытательном геофизическом полигоне.....	104
4.3.1	Результаты испытаний на скважине «100».	106
4.3.2	Результаты испытаний на скважине «300 м».....	112
4.3.3	Результаты экспериментов по передаче сообщения на скважине «300 м».....	119
	Выводы	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		124
ЛИТЕРАТУРА		124
ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДУЛЬ ВИБРАЦИОННЫЙ		132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЕНЕРАТОР ТОКА		133
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ		134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Аварии на рудных и угольных шахтах происходят с давних времен. С момента начала промышленных масштабов разработки и добычи полезных ископаемых частота возникновения обвалов и количество жертв приняли катастрофический характер. Обвалы и взрывы в шахтах по всему миру происходят по статистике едва ли не еженедельно, выливаясь зачастую в социальные протесты. Что доказывают, например, события в Турецком городе Сома, а также в России после трагедии на шахте «Распадская» в Кемеровской области. Последняя авария на шахте «Северная» в Воркуте, смерть десятков шахтеров и спасателей заставляет еще раз задуматься как о причинах аварии, так и минимизации последствий для здоровья и жизни работающего персонала.

Конкурировать с российскими шахтами по своей опасности могут Украина, Турция и Китай. У наших соседей по СНГ за последние 20 лет несколько крупных аварий произошло в Донецкой и Луганской областях. Самая страшная из них имела место на шахте им. Засядько в Донецке: 18 ноября 2007 года погиб 101 горняк. Там же всего через 2 недели погибли 52 шахтера, а еще через день 5 горноспасателей.

Самая масштабная трагедия на угольных разработках в истории Китая произошла в феврале 2005 года. Тогда взрыв метана на шахте "Суньцзявань" в провинции Ляонин унес жизни более 200 человек. 21 ноября 2009 года в результате взрыва метана в провинции Хэйлунцзян погибли 104 шахтера.

В Турции до недавнего времени самой крупной считалась катастрофа, имевшая место в 1992 году. На шахте в провинции Зонгулдак погибли 270 шахтеров. Однако 13 мая 2013 года, на угольной шахте неподалеку от города Сома, произошла авария, жертвами которой стали 292 человека. Сначала на шахте произошел взрыв, после чего в руднике начался пожар. В результате инцидента десятки горняков оказались заблокированными в шахте на глубине примерно двух километров. Было установлено, что большая часть шахтеров погибла не в результате обвала, а именно вследствие отравления угарным газом.

Таким образом, последняя трагедия в Турции обнажила проблему отсутствия в шахтах спасательных бункеров-убежищ, которые могли бы сохранить сотни жизней горняков в случае обвала. Осознавая проблему, по пути повышения организации безопасности работы в шахтах активно движется Китай. Только в 2008 году правительство КНР вынуждено было закрыть около 1 тыс.

шахт, так как они не отвечали нормам безопасности, приняв закон о необходимости оборудования шахт спасательными бункерами.

В 2013 году ситуация сдвинулась с мертвой точки и в России, которая последовала примеру развитых стран в вопросах обеспечения безопасности. В частности, были приняты изменения в «Правила безопасности в угольных шахтах», утвержденные постановлением Госгортехнадзора России, гласящие о том, что «Для спасения людей в шахтах оборудуются пункты коллективного спасения персонала (ПКСП). Необходимость оснащения шахты пунктами переключения самоспасателей (ППС) и ПКСП и их размещение в горных выработках определяются техническим проектом оборудования шахты пунктами ППС и ПКСП, утвержденным техническим руководителем (главным инженером) шахты». Данный приказ вступает в силу:

- для строящихся и реконструируемых шахт с 1 января 2014 года;
- для действующих шахт с 1 января 2015 года.

Спасательные пункты – это автономные сооружения, которые должны обеспечивать поддержку жизнедеятельности персонала на все время аварийно-спасательных работ. ПКСП предусматривает обязательное наличие технических средств контроля содержания метана, оксида углерода, диоксида углерода, кислорода и температуры внутри ПКСП и в рудничной атмосфере. ПКСП обеспечивается обособленным или автономным проветриванием. Комплектация ПКСП включает в себя средства индивидуальной и коллективной защиты, средства оказания первой помощи, оборудование и снаряжение аварийно-спасательных формирований.

Одним из ключевых требований, предъявляемых к спасательным сооружениям, является пункт о том, что ПКСП должен быть оборудован средствами связи с диспетчером шахты, так как связь с укрывшимся в ПКСП персоналом во время аварийно-спасательных работ необходима. В первую очередь, для определения места нахождения людей, принятия оперативных решений по управлению поисково-спасательной операцией, а также для передачи информации о количестве находящихся в укрытии горняков и состоянии их здоровья.

Организация двухстороннего канала связи «диспетчер-ПКСП-диспетчер» является задачей сложной и требующей комплексного подхода для ее решения, вследствие сильного затухания электромагнитных волн в горных породах из-за их высокой проводимости. При этом, если канал передачи информации в направлении «диспетчер-ПКСП» может быть организован в радиодиапазоне путем классического подхода к построению аппаратуры канала связи с выбором оптимального диапазона частот и увеличением мощности передатчика, то ка-

нал «ПКСП-диспетчер», напротив, требует нетривиального решения с высоким уровнем научной и инновационной составляющих. Технология связи, проникающей сквозь горный массив «сверху-вниз», использующая низкочастотный электромагнитный канал разработана Красноярскими учеными в 1980-х годах. На базе этой технологии были созданы системы "Радиус Земля-3М и СУБР, которые нашли широкое применение на подземных рудниках и шахтах.

Многолетний опыт эксплуатации подтверждает, что на сегодняшний день системам, использующим проникающую сквозь горный массив технологию связи для оповещения угольных шахт, альтернативы нет. В 2013 году ЗАО НВИЦ «Радиус» за разработку и внедрение указанных систем награждено Золотой медалью и Дипломом МЧС России.

Между тем, разнообразные условия эксплуатации электромагнитных каналов связи в горных выработках характеризуются существенной зависимостью надежности передачи информации и дальности действия от физических свойств горных пород, тектоники их формирования, уровня помех и не имеют однозначного решения для всех типов шахт.

Особенно остро проблема стоит в передаче сообщений с глубоких забоев в момент аварии, когда пространство пребывания людей ограничено и развертывание больших антенн для электромагнитных систем связи невозможно.

На сегодняшний день можно констатировать, что в России и за рубежом отсутствуют автономные беспроводные средства связи для передачи информации через горные породы, особенно в направлении «горная выработка-поверхность» на случай аварийных и чрезвычайных ситуаций.

Степень разработанности проблемы. Проблема сейсмического канала передачи сообщений в горных выработках является комплексной и для ее решения необходимы знания областей науки и техники, таких как радиофизика, сейсморазведка, гидроакустика, электродинамика, силовая электроника, цифровая обработка сигналов.

Задачами повышения эффективности возбуждения сейсмических волн, посвящены труды научно-исследовательская лаборатория (НИЛ-6) "Виэмтех" при Тольяттинском государственном университете, под руководством д.т.н., профессора Ивашина В.В.

Вопросы распространения и регистрации сложных сейсмических волн в своих работах изучали д.т.н. Шнеерсон М.Б., д.т.н. Кострыгин Ю.П., Бондарев В.И. и др. Известными исследователями из числа зарубежных ученых являются Milton V. Dobrin, J. Wong, M. Vecquey, L.A. Martin и др.

В 2010-2012 г. в Сибирском Федеральном Университете совместно с индустриальными партнерами

стриальным партнером ОАО "Енисейгеофизика" под научным руководством д.т.н., профессора Шайдурова Г.Я., и к.т.н. Деткова В.А. был проведен комплекс работ по повышению эффективности импульсной невзрывной сейсморазведки согласно постановлению Правительства Российской Федерации №218, где был получен большой опыт создания и излучения мощных сейсмических волн и математической обработки сигналов для целей сейсморазведки. Это позволило достаточно быстро провести проверку идеи использования невзрывной технологии сейсморазведки для целей связи через горную породу.

Идея передачи информации при помощи модулированных акустических волн не нова и активно используется в гидроакустических телекоммуникационных системах. Хочется отметить как отечественных исследователей - к.т.н. Бурдинский И.Н., так и зарубежных - James C. Squire. В их работах большое внимание уделяется радиотехническим методам позволяющим на практике реализовывать оптимальные методы передачи информации.

Эти работы не могут быть в чистом виде применены для решения проблемы передачи информации через горную породу, за счет различий в физике возбуждения модулированных волн. Однако в отличие от морской воды, связь через горную породу требует специальное научно-техническое обоснование и разработку совершенно новой технологии излучения и приема сообщений на новом носителе - низкочастотных сейсмических волнах, при прохождении через сложно построенную среду. Нельзя обойти вниманием и специфическую помеховую среду в основном техногенного происхождения в шахтах и рудниках.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является научное обоснование и разработка сейсмического канала передачи сообщений в горных породах для обеспечения двухсторонней аварийной связи с подземными объектами, с минимизацией приемо-передающего оборудования. Достижение вышеуказанной цели исследования предусматривает решение следующих задач:

- разработать управляемый электромагнитный генератор сейсмических волн;
- разработать систему питания и управления электромагнитного генератора;
- исследовать распространение модулированных сейсмических волн в горной породе;
- разработать алгоритм модуляции и демодуляции сообщений;
- провести экспериментальные исследования, направленные на изучение зависимости, передачи информации от параметров генератора сейсмических волн и качественного состава горной породы;
- реализовать аппаратно-программный комплекс связи.

Научная новизна.

1. Впервые дано научно-техническое обоснование канала передачи сообщений через горную породу на сейсмических волнах, включающее оценку энергетических соотношений для сигналов и помех с учетом реальных напряженно-деформированных параметров среды распространения.
2. Разработан принцип работы электромагнитного вибратора с двухфазным излучением за счет использования демпфирующих пластин специальной формы.
3. Впервые создан канал аварийной передачи телеграфных сообщений с помощью модулированных сейсмических волн с адаптивной перестройкой несущих частот под окружающую помеховую обстановку.
4. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение Устройство сейсмической связи, заявка №2015117621/28 от 08.05.2015. Актуальность разработки подтверждена результатами Всемирной выставки шахтного оборудования MineExpo 2016 (США, Лас-Вегас, сентябрь 2016).

Практическая и научная значимость результатов.

Опытный образец системы АСС-1 передан в опытную эксплуатацию НВИЦ «Радиус» г. Красноярск. Создано средство передачи сообщений из аварийных рудников и шахт, существенно повышающее безопасностью работы персонала и горноспасателей.

Методология и методы исследования. Предлагаемое исследование опирается на труды отечественных и зарубежных ученых по проблемам оптимизации каналов связи, теории возбуждения и распространении сейсмических волн. В соответствии с теоретико-эмпирическими методами, была создана модель, позволяющая использование классических радиотехнических приемов передачи информации, применительно к сейсмическим волнам. Легитимность данного подхода основана на линейности передаточной характеристике горной породы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Выявлена целесообразность внедрения средств передачи сообщений через горные породы из рудников и шахт, использующих сейсмические волны в качестве носителей информации, излучение которых возможно вибратором с размерами не более 1 м³.
2. Приведенные энергетические соотношения для сейсмического канала с учетом неоднородности передающей среды дают основание на передачу сообщений через горные породы на дистанцию 1000 м и с достаточной достоверностью. Результаты экспериментов, проводившихся на рудниках и шахтах, подтвердили правомерность основных теоретических предположений.

3. Обоснован выбор фазовой модуляции сейсмических волн, подходящий для передачи сообщений, с учетом особенностей конструкции излучателя, среды распространения сигнала и помеховой обстановки на действующих рудниках и шахтах.
4. Определены требования к конструкции излучателя сейсмических волн, системы питания и управления с возможностью изготовления серийной аппаратуры, сертифицируемой для использования в рудниках и шахтах опасных по пыли и газу.
5. Демонстрация опытного образца системы АСС-1 в среде экспертов в области разработки и создания систем комплексной безопасности подземных рудников и шахт подтвердила приоритет в создании первого в мире действующего сейсмического канала передачи сообщений через горную породу.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов и выводов исследования подтверждается применением комплекса методов теоретического и эмпирического исследований, адекватных целям и задачам, а также результатами практической апробации разработанного сейсмического канала. Апробация результатов проводилась как с отдельными частями канала, на моделях в лаборатории, так и с комплексом в реальных условиях.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры "Радиоэлектронные системы" Сибирского федерального университета; на научном семинаре кафедры "Приборостроения" Инженерной школы Дальневосточного Федерального Университета (г. Владивосток, 2015); на научно-технической конференции "Современные проблемы радиотехники" (г. Красноярск, 2012); III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Электронные приборы, системы и технологии" (г. Томск, 2013), на международных конференциях SIBCON (г. Омск, 2015, г. Москва, 2016), международная выставка Mine Expo 2016 (г. Лас-Вегас, США, 2016).

Публикации. По результатам выполненных исследований было опубликовано 11 печатных работ. Из них 6 работ опубликованы в научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, включая 1 патент на изобретение, 3 статьи в изданиях, цитируемых Scopus.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 136 листа, 96 рисунков, 10 таблиц. Список литературы включает 78 наименований.

Краткое описание структуры диссертационной работы.

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

В первой главе выполнен обзор современных систем аварийной связи в шахтах. Рассмотрены наиболее распространенные способы передачи информации через горную породу при помощи низкочастотных электромагнитных волн. Приведены их принципиальные ограничения. Показана возможность использования для передачи информации модулированных упругих деформаций горной породы - сейсмические волны, на примере гидроакустики и опыта наземной сейсморазведки с использованием сложных сигналах.

Во второй главе выполнены энергетические расчеты сейсмического канала связи. Дана оценка технических параметров приемо-передающей аппаратуры. Описан протокол передачи сообщений, начиная от способа модуляции и заканчивая корреляционной обработкой принятого кодового сообщения.

В третьей главе дано обоснование конструктивной схемы узлов приемника и передатчика. Большое внимание уделено выбору электромеханического привода передатчика и способу его расчета. Выполнен анализ распределения энергии в зависимости от коммутирующей цепи. Обоснован выбор схемы импульсного преобразователя напряжения для заряда емкостного накопителя энергии, проанализированы особенности его работы и приведены основные энергетические расчеты.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных и полевых испытаний, как отдельных узлов, так и системы в целом, выполнен их анализ. На основании выполненной работы определены перспективные направления совершенствования конструкции аппаратной части и доработки алгоритмов цифровой обработки сигналов. Составлены достоверные требования для проектирования серийного устройства.

Работа выполнена в научно-образовательном центре "Иридий" Военно-инженерного института Сибирского федерального университета при финансовой поддержке грантов РФФИ: 15-07-04859 "Разработка физических основ передачи информации через горную породу для обеспечения аварийной связи в шахтах 15-45-04445 "Исследование метода возбуждения фазоманипулированных сейсмических колебаний для повышения эффективности сейсморазведки в сложных геолого-геофизических условиях Восточной Сибири" и программы "Старт" Фонда содействия инновациям.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам Военно-инженерного

института: д.т.н. проф. Шайдурову Г.Я. - научному руководителю, к.т.н., доценту Кудинову Д.С., доценту Романовой Г.Н., аспирантам Артемьеву К.А., Кохоньковой Е.А., инженерам Воронцову Ю.С., Фомину А.Н., Корольковой Е.Б, а также сотрудникам НВИЦ "Радиус" Кочневу В.А., Кочневу А.В., Дегилевичу С.Н., принявшим активное участие в постановке проблемы и исследованиях нового канала передачи сообщений.

Глава 1

Анализ состояния и выбор направления исследований

Аварийная шахтная связь является частной задачей глобальной проблемы поиска способов передачи информации через среды, обладающие высокой проводимостью. В этой главе рассмотрены основные существующие технологии передачи информации.

1.1 Радиоволновые шахтные системы связи

Распространение электромагнитных волн через горные породы, имеющие сложные и неоднородные структуры, подвержено рассеянию, поглощению и дисперсии, за счет своих природных свойств и пространственных ограничений. Затухание главным образом зависит от диэлектрической проницаемости и проводимости среды. Относительная диэлектрическая проницаемость угля с 15% уровнем влажности равна 4. Удельная проводимость, зависит от сорта угля и составляет от 10, до 0.02 мСм/м. [1]

В связи с особенностями распространения радиоволн современные системы беспроводной связи до недавнего времени под землей практически не использовались. Но в настоящее время, благодаря техническому прогрессу, построение системы подземной радиосвязи стало возможным. Такие системы значительно дополняют и расширяют функции существующих решений.

1.1.1 Излучающий кабель

Одна из технологий, обеспечивающих саму возможность распространения радиоволн в подземных условиях – применение излучающего кабеля (излучающий кабель – это коаксиальный радиочастотный кабель, во внешнем проводни-

ке которого имеются отверстия). Благодаря этим отверстиям, электромагнитное поле существует не только внутри, но и снаружи кабеля.

Сущность технологии состоит в том, что на требуемом объекте прокладывается кабельная линия, выступающая в роли территориально распределенной приемопередающей антенны. К данному кабелю через стандартные радиочастотные ответвители подключаются приемопередатчики базовых станций требуемых стандартов радиосвязи. Предлагаемый кабель имеет круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной продольной оси кабеля. Электромагнитная энергия излучается равномерно по всей длине кабеля. Таким образом абонентские станции (мобильные телефоны) требуемого объекта оказываются в зоне непрерывного радиопокрытия соответствующих систем связи. [4].

Благодаря широкой полосе рабочих частот излучающего кабеля, возможна организация работы одновременно нескольких систем подвижной радиосвязи (стандарты TETRA, NMT-450, GSM, UMTS, CDMA2000/EV-DO, LTE, семейства протоколов 802.11/16, а также любых аналоговых систем подвижной радиосвязи). На рис. 1.1 схематично показано как включение двух базовых станций разных стандартов через широкополосный волновые ответвители и соединительный неизлучающий фидер к излучающему кабелю, закрепленному на стене туннеля.

Для компенсации затухания сигнала в кабеле используются усилители. Электропитание линейных усилителей, как правило, осуществляется по излучающему кабелю. Таким образом, при использовании линейных усилителей питания и внешних источников возможно создание кабельных сетей большой протяженности. В настоящее время системы на базе излучающего кабеля получили наиболее широкое распространение в качестве решения по организации подвижной радиосвязи на шахтах и рудниках добывающих предприятий по всему миру. [2]

Создаваемые транспортные распределительные сети на базе излучающего кабеля являются основой для развертывания в подземной части рудников и шахт различных типов систем:

- оперативно-диспетчерского управления;
- радиотелефонной связи;
- промышленного телевидения;
- персонального радиовызова;
- разнообразных систем контроля и управления технологическими процессами (определения местоположения персонала и техники, управления системой вентиляции, водоотливом, атмосферного контроля и т. д.). [3]

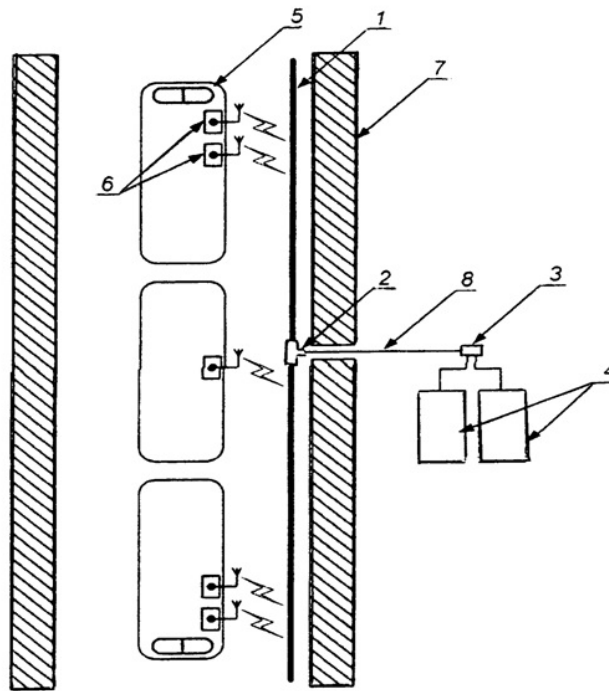


Рис. 1.1: Блок-схема системы.

1. подземный излучающий кабель (2.5 ГГц);
2. радиочастотные ответвители;
3. широкополосные волновые объединители;
4. базовые радиостанции;
5. подвижные объекты (вагоны электропоезда);;
6. абонентские радиостанции (мобильные телефоны);
7. стенки туннеля;
8. соединительные неизлучающие фидеры;

1.1.2 Шахтный комплекс аварийной связи

Другая система, получившая распространение, может быть использована в шахте при проведении спасательных работ. Шахтный комплекс аварийной связи на базе беспроводной сенсорной сети содержит на поверхности шахты блок управления командного пункта с телефонным аппаратом и телефонную линию, соединяющую блок управления с подземными абонентами. В выработке комплекс содержит беспроводную сенсорную сеть, состоящую из вычислительно-коммутационных радиоустройств-ретрансляторов и оконечного устройства, которое через устройство гальванического разделения цепей и адаптер соединяется с телефонной линией. Носимые абонентские устройства размещаются в индивидуальных осветительных приборах шахтера и по радиотелефонному ка-

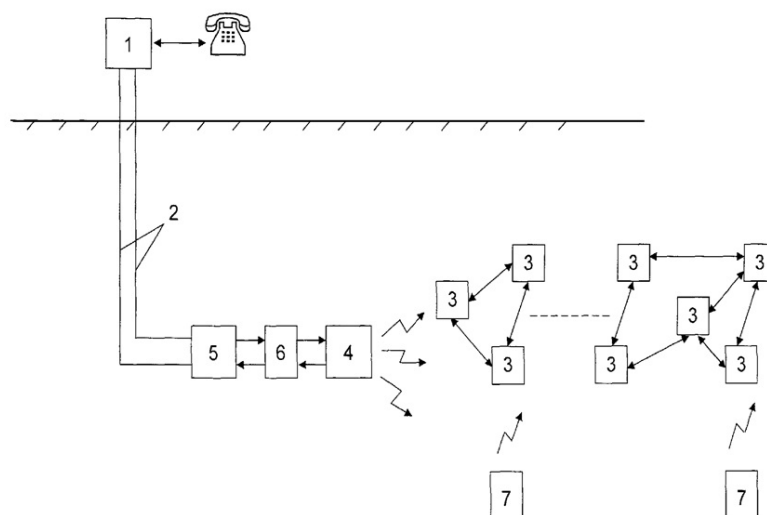


Рис. 1.2: Структурная схема шахтного комплекса аварийной связи.

налу соединяются с ближайшими ретрансляторами сенсорной сети. Это позволяет организовать речевой (телефонный) радиоканал для связи подземных абонентов между собой и с поверхностью шахты, увеличить дальность устанавливаемой связи, повысить надежность радиосвязи под землей. [9]

Подземная часть системы состоит из базовой станции, репитеров (ретрансляторов) с направленными антеннами и носимых абонентских терминалов. Система работоспособна в подземных условиях, но эффективность ее недостаточна, особенно при организации спасательных работ в аварийных ситуациях. Дело в том, что распространение радиоволн в замкнутом пространстве, в частности в подземных выработках, связано с множеством проблем. Радиосвязь возможна только в пределах прямой видимости. Из-за быстрого затухания радиосигналов дальность передачи незначительна.

Положение улучшают репитеры (ретрансляторы), но антенны их достаточно громоздки, требуют точной ориентации в пространстве. Но главное - по стандарту DECT можно применить только три репитера, что существенно ограничивает дальность радиосвязи. Так по результатам испытаний в шахтных условиях дальность радиосвязи в подземных выработках составила 1-1,5 км, что недостаточно для проведения спасательных работ.

Новый класс распределенных коммутационных систем - сенсорные сети - базируется на новейших технологиях беспроводной связи. Беспроводные сенсорные сети состоят из миниатюрных вычислительно - коммутационных устройств - мотов (от англ. motes - пылинки), или сенсоров. Каждый сенсор содержит процессор, память, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики.

Важной особенностью данных сенсоров, или мотов является их способность обмениваться информацией между собой с помощью приемопередатчиков, работающих в радиодиапазоне. При этом информация передается от одних мотов другим по цепочке. С помощью программного обеспечения моты самостоятельно входят в связь с соседними подобными устройствами и могут образовывать сенсорную сеть различной структуры.

Один из мотов, обычно это крайнее устройство в цепочечной структуре, который является более сложным, собирает всю аккумулированную ближайшими мотами информацию для дальнейшей передачи потребителю. Данный мот называется шлюзом, координатором или оконечным радиоустройством. Остальные моты, составляющие сенсорную сеть, называются ретрансляторами.

Большим преимуществом сенсорных сетей является то, что, несмотря на маломощные передатчики с небольшой дальностью связи (около 100 м), протяженность самой сети может достигать 10 и более километров за счет практически неограниченного количества ретрансляторов. Сами ретрансляторы являются миниатюрными, маломощными устройствами с индивидуальными источниками питания, что позволяет быстро и без проблем развернуть сеть в сложных условиях.

Задача технологии в создании эффективного речевого радиоканала в подземных условиях.

Поставленная цель достигается тем, что в шахтный комплекс аварийной связи на базе беспроводной сенсорной сети, содержащий на поверхности шахты блок управления командного пункта с телефонным аппаратом и телефонную линию, соединяющую блок управления с подземными абонентами, а в подземной выработке содержащий беспроводную сенсорную сеть, состоящую из вычислительно-коммутационных радиоустройств-ретрансляторов, количество которых в комплекте зависит от длины контролируемой выработки, и оконечного радиоустройства, введены два или более абонентских устройства, размещаемых в индивидуальных осветительных приборах шахтера, адаптер и искробезопасное устройство гальванического разделения цепей, при этом адаптер с одной стороны подсоединяется к двухпроводной телефонной линии, а с другой стороны через устройство гальванического разделения соединяется с оконечным радиоустройством.

Комплекс работает следующим образом. Передаваемое с командного пункта речевое сообщение через блок управления и телефонную линию в режиме обычной телефонной связи через адаптер и искробезопасное устройство гальванического разделения попадает в оконечное радиоустройство, где преобра-

зается в цифровой радиосигнал и передается в сенсорную сеть, образованную ретрансляторами. Все переносимые абонентские устройства получают данное сообщение от своего ближайшего ретранслятора.

Аналогично речевое сообщение с любого переносного ретранслятора через сенсорную сеть попадает в оконечное радиоустройство, а затем через телефонную линию на командный пункт. Таким образом, впервые предлагается организовать речевой (телефонный) радиоканал для связи подземных абонентов между собой и с поверхностью шахты, используя сенсорную сеть, развернутую в подземной выработке.

Преимущество радиотелефонной связи по беспроводной сенсорной сети состоит в том, что дальность устанавливаемой связи, особенно в подземных условиях, может достигать значительных расстояний и зависит только от количества ретрансляторов, образующих сенсорную сеть. Повышается надежность радиосвязи под землей, так как в случае отказа нескольких ретрансляторов канал связи остается работоспособным. Связь устанавливается обходным путем, минуя вышедшие из строя ретрансляторы. [9]

Недостатком данного устройства является проводная линия связи шахтной выработки с поверхностью.

1.1.3 Зарубежный опыт

Подземные мобильные сети

British Telecoms (BT) поставляют оборудование беспроводного канала связи для промышленного использования, в том числе для шахт. В настоящее время оно используется в ряде платиновых шахтах, BT промышленные коммутаторы построены по технологии мобильной сети, которая соединяет беспроводные точки доступа используя радиоканал.

Технология достигла, так называемого 2-го уровня (канальный уровень), таким образом конфигурация сети происходит локально, без необходимости контроля с поверхности. Способность самовосстанавливаться очень важна для промышленных беспроводных систем, в связи с тем, что в случае аварийной ситуации и выходе из строя нескольких точек доступа, связь останется доступной и таким образом можно будет точно определить место, где произошла авария.

Представленная система не является традиционной RFID-технологией, она использует возможность определения местоположения шахтеров, в режиме реального времени с помощью ряда беспроводных датчиков, которые могут быть внедрены в спецодежду, головные светильники или шахтные машины. Каждый

датчик обладает уникальным идентификационным номером в беспроводной сети, что позволяет в центре управления следить за всеми событиями, проходящими под землей.

Подземная спутниковая связь

В июне 2013 года, Gilat Satcom, лидер в области оптико-волоконных линий связи, анонсировал запуск новой системы, обеспечивающей высококачественную связь в подземных выработках.

Система SuricatePRO обеспечивает расширенное покрытие для стандартных сотовых телефонов под землей без потери качества сигнала. По заявлению компании, внедрение технологии не вызывает сложности, достаточно установить подземный и поверхностный ретрансляторы, соединенные оптико-волоконным кабелем (длинной до 6 км). После этого пользователям будут доступны спутники системы Иридиум, большой группе спутников, обеспечивающей зону покрытия для спутниковых телефонов, как если бы абоненты находились под открытым небом.

Данная технология использует передачу радиочастоты через оптику, свет модулируется радиосигналом и распространяется по оптическому кабелю до демодулятора светового потока. Изначально получила распространение в подземных бункерах для управления вооруженными силами, сейчас же Gilat прошел адаптацию для условий подземных рудников.

Низкочастотная радиосвязь компании E-Spectrum Technologies

Rescue Dog (с) - система связи, обеспечивающая передачу сигнала сквозь толщу породы в случае аварийной ситуации на шахте.

Технология, получившая сертификацию Управления по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых (США), состоит из поверхностного модуля объединенного с одним или несколькими подземными блоками. Поверхностный модуль может общаться с определенным, активированным подземным блоком, в тоже время прослушивать аварийные сигналы радиомаяков от других подземных блоков.

Подземные блоки имеют аккумуляторное питание, достаточное для работы в режиме ожидания на протяжении нескольких месяцев. Они выполнены во взрывозащищённых корпусах и находятся возле спасательных бункеров, вдоль аварийных выходов, возле аварийного оборудования и всех местах которые могут быть критическими при эвакуации.

После того, как подземный блок активируется, аварийное сообщение автоматически отправляется на поверхность. Это сообщение будет периодически передаваться до тех пор, пока не придет ответ от оператора на поверхности.



Рис. 1.3: Терминал шахтной связи от Rescue Dog

После получения подтверждения, подземный модуль автоматически переходит на выделенную частоту для прямого общения с оператором. Если наружный модуль был включен после отправки первого аварийного сообщения, он может определить время начала передачи аварийного сообщения, по специальным меткам.

Система Rescue Dog всенаправленная, не использует традиционные петлевые рамочные антенны, в отличие от других системы передачи информации сквозь землю. Она легко монтируется из-за отсутствия необходимости протягивать петли антенны внутри шахтных штреков или на поверхности земли, тем ни менее существуют строгие требования к заземлению оборудования.

Индукционная система связи компании Lockheed Martin

Разработка началась в 2006 году по инициативе Управления по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых (США), для улучшения пост-аварийных систем связи, данная технология MagneLink обеспечивает спасателей связью непосредственно с заблокированными шахтерами.

MagneLink - это сертифицированная система, обеспечивающая двухсторонний канал связь сквозь толщу породы, в независимости от поверхности и шахтной инфраструктуры. Она обладает возможностью передачи речи, цифровых данных и аварийных сигналов, для обеспечения связи между спасателями и шахтерами, когда все основные линии связи разрушены.

Слои породы над угольной шахтой ослабляют энергию любого, проходящего сквозь них сигнала, поэтому для выделения слабого сигнала и его декодирова-



Рис. 1.4: Терминал шахтной связи от Lockheed Martin

ния требуется специальная обработка.

При отправке сообщения петлевая антенна системы находится под напряжением и создает так называемый "пузырь". Сообщение "всплывает" на поверхность и излучает магнитную энергию. При наличии другой системы MagneLink, находящейся поблизости, сообщение ретранслируется. Система работает на дистанциях до 500 м из недр на поверхность, и 800 м горизонтально в шахте.

Технология была разработана в сотрудничестве с Consol Energy в 2012 году, и распространяется компанией Delta Electric [16].

1.2 Гидроакустические системы связи

Одним из направлений передачи информации через среды с высокой электропроводностью является гидроакустический метод. С помощью подсистем гидроакустической связи и телеуправления обеспечивается функциональная связь с глубоководными донными автономными станциями. Первые образцы функционально связанных глубоководных донных акустических станций [7] были созданы СКБ САМИ в 1986-1990 годах.

Основными функциями системы гидроакустической связи (рис.1.5), является передача на борт обеспечивающего корабля информации о техническом состоянии блоков и систем станции в процессе погружения, установки на дно и при всплытии, изменении режимов работы и экстренном включении устройств на всплытие.

Надежность и помехоустойчивость канала гидроакустической связи и телеметрии определяют надежность работы всего комплекса автономных станций.

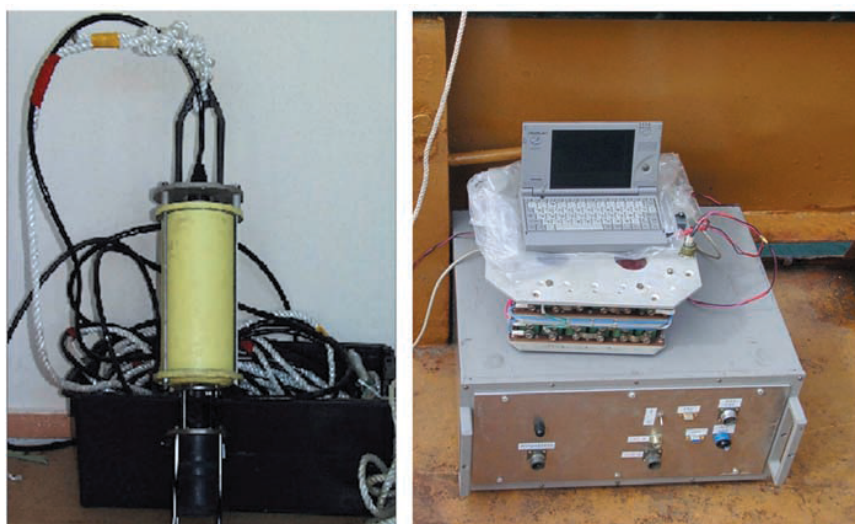


Рис. 1.5: Модуль корабельного комплекса гидроакустической связи.

Основные характеристики гидроакустического канала передачи телеметрической информации автономных станций серии "Мастеровой" приведены в таблице 1.1 [8].

Рабочая частота	30 кГц
Рабочая полоса частот	1 кГц
Метод модуляции	ОФМ со скоростью 200 бод
Разделение сигналов между автономными донными станциями	кодвое
Разрядность команды управления	16 бит
Вероятность ложного срабатывания	не хуже 10^{-8}

Таблица 1.1: Основные характеристики гидроакустического канала телеметрии.

В настоящее время разработка гидроакустических средств телеуправления и телеметрии относится к числу приоритетных задач при создании подводных роботов. В используемых гидроакустических средствах с дальностью действия 10-15 км, используются, как правило, простые сигналы с частотно временным разделением для кодирования информации и обозначения абонентов навигационной сети [5].

В последнее время для целей гидроакустической навигации и связи широкое распространение получили разработки, связанные с применением фазоманипулированных сигналов. Данный подход использован в ряде работ, посвященных экспериментальным исследованиям низкочастотных систем большой дальности действия [6].

1.3 Сейсмические системы связи

По своей физической природе сейсмические системы связи схожи с гидроакустическими, с тем лишь отличием, что волны распространяются через горные массивы, имеющие явно выраженный неоднородный характер.

В настоящее время ведутся работы по созданию системы передачи информации о местоположении пострадавших при ЧС, при помощи сейсмического канала связи, избавленную от недостатков существующих аварийных средств связи [10].

Данная технология уходит корнями в сейсморазведку полезных ископаемых но имеет несколько важных отличий.

Для геологической сейсморазведки, сейсмические волны возбуждаются при помощи взрывчатых веществ, гидродинамических или электромеханических вибраторов. Эти методы генерируют широкополосный сейсмический сигнал. Сейсмические волны отражаются и переотражаются от подземных слоев породы и затем регистрируются массивом геофонов, которые преобразуют механические вибрации в электрический сигнал. Временная задержка регистрации сигнала между геофонами позволяет определить структуру слоев среды.

Использование сейсмических волн для спасения шахтеров, где в качестве передатчика использовалась бьющая по анкерному болту кувалда, а сигналы регистрировались при помощи сейсмоприемников было предложено в 1974. Однако, получаемый таким образом широкополосный сигнал не был эффективным, из-за высокого коэффициента затухания сейсмических волн высокой частоты [14].

Решение исследователей из Virginia Military Institute, США, позволяет рабочим в случае аварии, при помощи излучателя сейсмических волн передать сигнал сквозь толщу породы. Сейсмические волны, достигнув установленного на поверхности приемника, позволят спасательной команде определить местоположение пострадавших шахтеров, так как каждый передатчик имеет заранее строго определенную частоту. Таким образом когда сигнал достигает поверхности, спасатели знают доподлинно где находятся пострадавшие.

В связи с тем, что гармонический сигнал излучается на протяжении относительно длительного времени, в сравнении с одиночными сейсмическими импульсами или модулированным сигналом, которые изменяются во времени, он может быть эффективно выделен из фонового шума. Это происходит за счет того, что спектральная мощность гармонического сигнала растет линейно в зависимости от времени его распространения, в отличие от частотно-

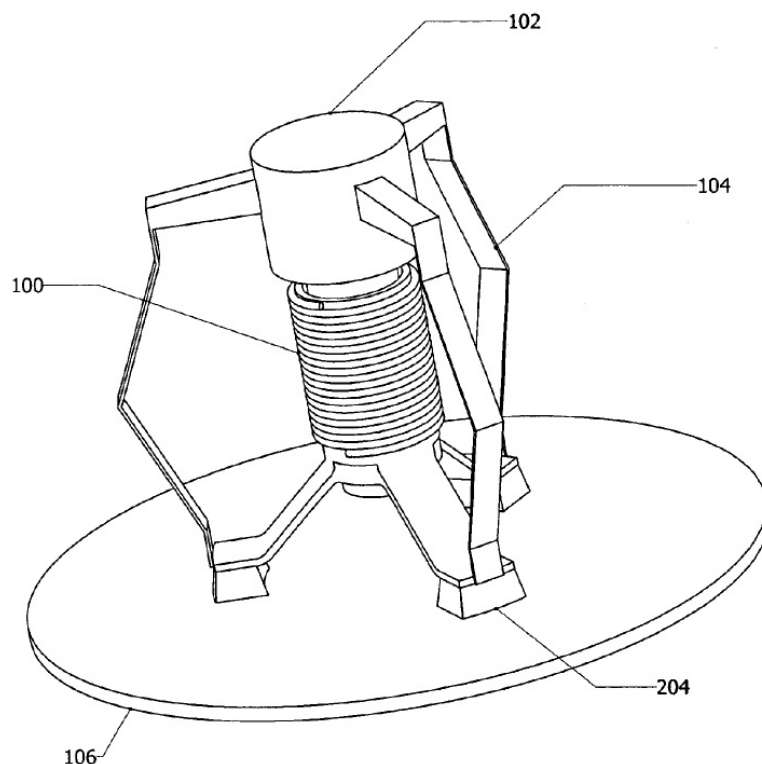


Рис. 1.6: Изометрия сейсмического излучателя. 100 - катушка возбуждения; 102- инерционная масса; 104 - направляющие рессоры; 106- излучающая плита; 204- фиксирующие скобы.

модулированных сигналов и посторонних шумов. Что позволяет выделять сигнал излученный относительно слабым передатчиком [11].

На рис. 1.6, изображен излучатель сейсмических волн. Он состоит из двух магнитов, один из которых - электрический, управляемый генератором, при груза, излучающей плиты и направляющих рессор. Задача рессор заключается в ограничении степени свободы движущейся инерционной массы и ее возврат в нейтральное положение, под действием силы упругости. Задающий генератор сигналов способен работать в диапазоне от 0 до 500 Гц. Рабочая частота выбирается исходя из наличия сосредоточенных помех и амплитудно-частотной характеристики среды.

Экспериментальные исследования подтвердили, что мощность сигнала уменьшается в обратно-квадратичной зависимости ($1/r^2$) от расстояния до передатчика. При использовании излучателя мощностью 500 Вт, сигнал удалось детектировать с глубины 60 метров при времени накопления - 60 сек. Для выделения сигнала с глубины более 250 метров потребовалось 4 минуты [10].

Для того чтобы шахтеры могли передать информацию не только о своем местоположении, но и, например о их количестве, состоянии здоровья, запасах воздуха, James Squire предложил каждому сообщению будет заранее определена своя частота сигнала. [12].

1.4 Выбор направления исследования

Анализ известных разработок, научных публикаций и патентов показывает, что для решения задач беспроводной связи горная выработка-поверхность, при ограниченном объеме пространства для размещения аппаратного комплекса, включая антенну-излучатель, наиболее перспективно исследовать характеристики и возможности сейсмического канала связи.

Подобный подход целесообразен и в смысле импортозамещения, поскольку в России такая постановка задачи делается впервые.

Для решения указанной проблемы необходимо:

1. Исследовать физические свойства канала распространения сейсмических волн.
2. Проанализировать теоретические зависимости для оценки энергетических и информационных свойств канала.
3. Разработать и экспериментально проверить физические основы и коммуникационные характеристики сейсмического канала связи.

Выводы

1. Обилие различных систем аварийной шахтной связи, как отечественного, так и зарубежного производства, подчеркивает общемировую востребованность данного вида связи.

2. Существующие беспроводные системы связи можно условно разделить на низкочастотные, использующие для передачи протяженные антенно-фидерные устройства, и высокочастотные приемопередатчики УКВ и СВЧ диапазона, которые имеют в своём составе проводные линии связи, либо каналы прямой видимости. Данные системы хорошо подходят для постоянной оперативной связи с диспетчером шахты, но не для аварийной связи, способной функционировать при разрушении коммуникаций.

3. По опыту сейсморазведки для решения проблемы аварийной связи горная выработка-поверхность целесообразна проработка сейсмического канала, потенциально обеспечивающего передачу сигналов через горную породу при размещении аппаратных компонентов в пространственно малых объемах.

4. В задачу исследования входят теоретические и экспериментальные обоснования применения сейсмического канала при работе через горные породы с различными физическими свойствами.

Глава 2

Проблема передачи сообщений сейсмическим каналом связи

Задачей данной главы является расчёт и оценка амплитуды смещения пород при распространении сейсмических волн в зависимости от расстояния, частоты и коэффициента поглощения соответствующего различным типам горной среды. Необходимо провести расчёт отношения сигнал/шум на входе приёмного комплекса, расположенного на поверхности Земли, и выбрать вид модуляции обеспечивающий максимальную помехоустойчивость.

2.1 Виды сейсмических волн и способы их возбуждения

Теория распространения упругих (сейсмических) волн базируется на теории упругости, так как геологические среды в первом приближении можно считать упругими.

Волны являются особым видом движения, при котором изменение какой-либо величины или состояния среды передается от одной точки среды к другой с конечной скоростью.

При деформации частицы тела смещаются относительно друг друга и исходного положения. Величина и направление перемещений определяются характером внешних сил, их величиной и свойствами среды. Положение частиц тела после деформации можно найти, если известен вектор перемещений $U(x, y, z)$, отнесенный к исходному положению частиц.

Деформация полностью описывается шестью компонентами. Три первые компоненты называются продольными (нормальными) деформациями, три последние — сдвиговыми. При снятии нагрузки частицы тела могут вернуться или не вернуться в исходное положение. В первом случае говорят об обратимых, а во

втором о необратимых деформациях. Тела, в которых развиваются только обратимые деформации, называют упругими. Тела, в которых развиваются только необратимые деформации — пластичными, неупругими. Величина деформаций зависит от величины и характера внешних напряжений — сил, действующих на единицу площади. Горные породы ведут себя как упругие тела только при малых деформациях.

При деформации в упругом теле возникают внутренние напряжения, обусловленные упругим взаимодействием между частицами тела. На каждую площадку малого размера, мысленно выделяемую в теле, действуют напряжения, имеющие в общем случае составляющую, перпендикулярную к площадке — нормальное напряжение, и две, направленные вдоль площадки, называемые сдвиговыми напряжениями.

Динамическая теория упругих волн устанавливает, что в однородной изотропной среде возможны волны двух типов. Волны первого типа вызывают такие колебания частиц среды, при которых направление перемещения частиц совпадает с направлением распространения волны. Такие волны называют продольными (Р-волнами). Волны второго типа вызывают колебания, при которых частицы смещаются в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волн. Волны этого типа называют поперечными (S-волнами). В поперечных волнах вектор перемещения нормален к направлению распространения [18].

Существование свободной сейсмической границы — поверхности полупространства, контактирующего с воздушной средой, обуславливает появление особого класса волн — поверхностных. Энергия источника вертикальной силы, действующего на поверхности земли, распределяется между различными возбужденными сейсмическими волнами примерно в следующей пропорции: 7% — продольные волны, 25% — поперечные волны, 68% — поверхностные волны релеевского типа [24].

Источником упругих волн может являться любое устройство, позволяющее в заданный момент времени осуществить механическое воздействие на незамкнутую или замкнутую поверхность упругой среды. Простейшим видом источника упругих волн является молот, которым ударяют по поверхности земли или стенке горной выработки. Источник упругих волн в общем случае состоит из трех элементов: накопителя энергии (механической, химической, электрической, тепловой), устройства, позволяющего в заданный момент времени преобразовать накопленную энергию в механическое воздействие на упругое тело и рабочего органа, с помощью которого осуществляют механическое воздействие.

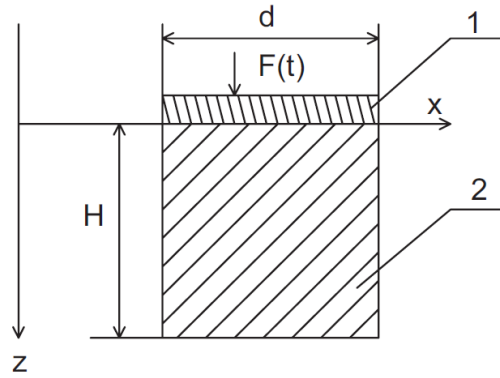


Рис. 2.1: Расчетная модель генерации сейсмического сигнала. 1 - плита излучения; 2 - присоединенный грунт; $F(t)$ - ударное воздействие; d - диаметр опорной плиты.

2.2 Энергетический расчёт сейсмического канала

Источник силой F в течение времени τ действует на плиту массой m_s , расположенную на грунте. Ускорение, с которым перемещается плита $a = a_0 + a_\tau$, где a_0 - ускорение в момент $t = 0$, a_τ - ускорение в момент времени $t = \tau$, где τ - длительность сейсмического импульса.

Если предположить, что ускорение изменяется от a_0 до a_τ линейно и в момент $t = \tau$, $a_\tau = 0$, то среднее значение ускорения $a = \frac{a_0}{2}$.

Смещение плиты и грунта происходит по оси z , рис.2.1.

По закону Ньютона $F = a \cdot m$ или

$$F = \frac{a_0}{2} m$$

где $m = m_s + m_g$, m_g - присоединенная масса грунта; m_s - масса плиты.

При давлениях, близких к пределу прочности пород, глубина зоны присоединенного грунта близка к величине [19]:

$$H = (2 \div 2.5)d$$

где d - эффективный диаметр опорной плиты (рис.2.1).

Амплитуда смещения под действием силы F равна:

$$\Delta z = \frac{a_0 \tau^2}{2} = \frac{F \tau^2}{2m} \quad (2.1)$$

Смещение грунта около источника A_0 связано со смещением плиты $A_0 = k \cdot \Delta z$, где k - коэффициент, зависящий от свойств грунта (плотности, модулей упругости). Значение k можно оценить экспериментально. Согласно (2.1), амплитуда смещения грунта прямо пропорциональна квадрату длительности

импульса сейсмического воздействия τ , что указывает на возможность существенного увеличения амплитуды излучаемых сейсмических волн.

В зависимости от характера изменения прикладываемой к плите силы и создаваемых при этом деформаций грунта поверхностные сейсмоисточники принято делить на вибрационные и импульсные [28].

Процесс взаимодействия импульсного излучателя с грунтовым полупространством при работах на предварительно уплотненных грунтах носит затухающий колебательный характер с собственной частотой, которая зависит от упругих свойств пород, слагающих самую верхнюю часть разреза и их массы.

В вибрационных модификациях волны возбуждаются протяженными во времени сигналами, которые получили название опорных или управляющих. Отражаясь и преломляясь на внутренних границах раздела, они образуют на первичных записях сложную интерференционную картину, в которой невозможно выделить отдельные волны. Их выделение осуществляют с помощью корреляционной обработки, которая основана на нахождении степени сходства посылаемых в землю и записанных сигналов. Для этого управляющие сигналы наделяют специальной "меткой". При использовании квазигармонических колебаний такой "меткой" является изменение частоты сигнала в процессе излучения, а в случае последовательностей импульсов - переменный временной интервал между ними, изменение их полярности или закона чередования положительных и отрицательных импульсов при постоянной частоте их следования в пределах посылки.

2.2.1 Основные параметры и характеристики для расчёта сейсмического канала

Для исследования ослабления смещения горной породы необходимо задать основные параметры для реализации сейсмического канала:

- Исследуемая полоса частот: $\Delta f = 10 - 150 \text{ Гц}$;
- Типы модуляции: ОФМ, ЧМ;
- Требуемая вероятность ошибки: $P_{\text{ошибки}} = 10^{-3}$;
- Расстояние от источника до приёмника: $r = 1000 \div 5000 \text{ м}$;
- Средняя скорость продольной волны в среде: $v_p = 3000 \text{ м/с}$;
- Номинальная сила удара источника: $F = 1500 \text{ Н}$;
- Масса ударной плиты: $m = 30 \text{ кг}$;

С помощью вышеперечисленных параметров производится расчет уровня напряжения и отношения сигнал/шум на входе приемного комплекса, в зависи-

мости от расстояния, частоты и типа горной породы. По результатам данного расчета делаются выводы о возможности приема сигналов в различных условиях среды и при различных параметрах системы. Исходя из расчёта и анализа основных параметров, можно сделать выводы о том, обеспечивается ли ее бесперебойная работа. Регулируемыми параметрами можно считать несущую частоту и ширину полосы сигнала, которые будут выбраны для каждого типа сред в ходе расчёта и оценки ослабления сигнала.

2.2.2 Расчет ослабления сигнала в среде

При прохождении через горную породу амплитуда сейсмического сигнала затухает, это обусловлено ослаблением амплитуды смещения пород в зависимости от расстояния и свойств среды. Во многих задачах сейсморазведки используются сейсмические волны со сферической формой волновых фронтов. Энергия, приходящаяся на единицу поверхности фронта, в этом случае убывает обратно пропорционально квадрату расстояния $\frac{1}{4\pi r^2}$, а амплитуда смещения — по закону $A_0 \sim \frac{1}{r}$.

На динамику сейсмических волн в реальных средах большое влияние оказывает степень поглощения сейсмической энергии. Поглощение вызывается потерями упругой энергии за счет необратимых процессов в среде вследствие ее неидеальной упругости. По этой причине амплитуда волны A_0 экспоненциально убывает с расстоянием r :

$$A(w) = A_0 \cdot e^{-\alpha_p(w)r} \quad (2.2)$$

где A_0 - начальное смещение породы; r - расстояние от излучателя до приёмника, м; $\alpha_p(w)$ - амплитудный коэффициент поглощения 1/м.

Амплитудный коэффициент поглощения, различен для разных пород. Он возрастает с ростом пористости, трещиноватости пород, с уменьшением глубины их залегания и водонасыщенности. В среднем у изверженных, метафорических и цементированных осадочных пород $\alpha = 10^{-6} - 10^{-3}(1/\text{м})$, у рыхлых осадочных пород $\alpha = 10^{-3} - 0.5(1/\text{м})$. Кроме того, он зависит от частоты сигнала и возрастает с увеличением частоты, приблизительно с линейной зависимостью. [18]

Распространение сейсмической волны в среде определяет волновое число $k = w/v_p$, которое является частотно зависимой функцией. Скорость распространения продольной волны в среде изменяется для различных типов по-

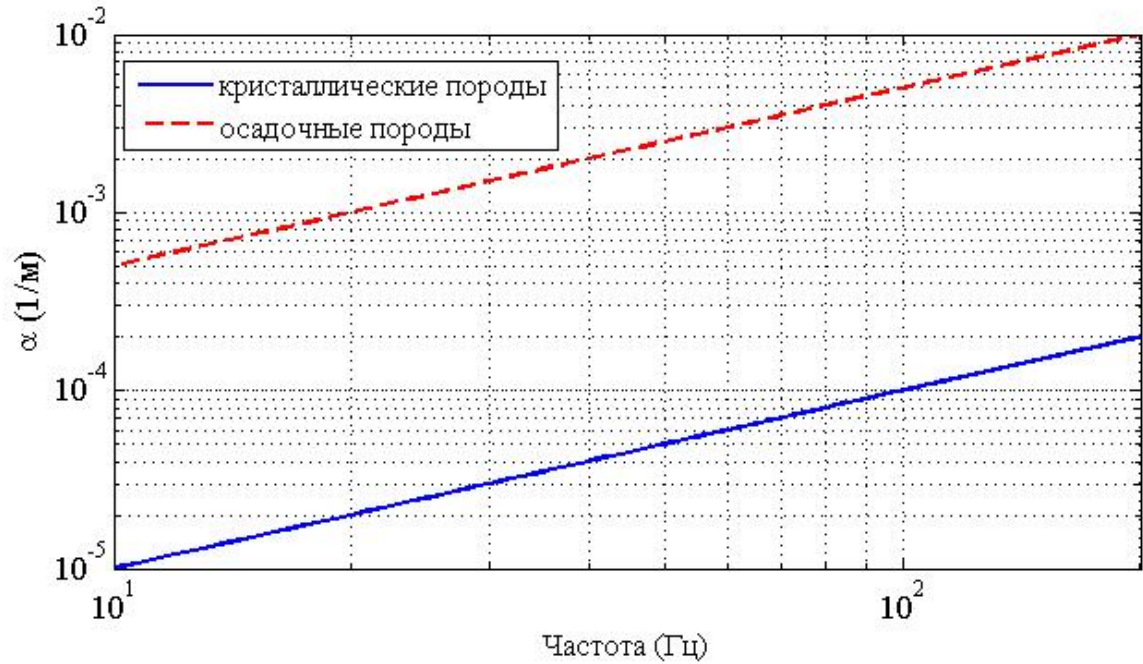


Рис. 2.2: Зависимость амплитудного коэффициента поглощения от частоты, для двух типов пород.

род. Скорость волны в плотной кристаллической породе $v_{p1} = 6000\text{м/с}$, в осадочных породах средней плотности (угольные пласты, крепкие известняки) $v_{p2} = 4500\text{м/с}$, в пористой и вязкой породе поверхностных слоёв Земли (глина, песок, почвенный слой) $v_{p3} = 1500\text{м/с}$.

Применяя законы ослабления к начальному смещению частиц породы, можно получить уравнение, отражающее характер затухания смещения пород в среде:

$$A(w) = \frac{A_0}{k(w) \cdot r} \cdot e^{-\alpha_p(w)r} \quad (2.3)$$

Для преобразования смещения пород в ЭДС используется сейсмоприёмник. Его основным свойством, как электромеханического преобразователя, является чувствительность $G = 0.03 \div 0.08\text{В/мм}$. [18] Применяя чувствительность сейсмоприёмника к формуле 2.3, можно получить зависимость уровня напряжения на выходе сейсмоприёмника от смещения пород на его входе:

$$U_c(w) = G \cdot \frac{A_0}{k(w) \cdot r} \cdot e^{-\alpha_p(w)r} \quad (2.4)$$

Смещение породы определяется силой удара источника, массой плиты и присоединённого грунта, и длительностью импульса:

Порода	Диапазон измерения плотности, г/см ³	Среднее значение плотности, г/см ³
Почва	1,40-2,20	1,80
Гранит	2,51-2,82	2,67
Диорит	2,68-2,96	2,84
Габбро	2,85-3,12	2,98
Диабаз	2,80-3,11	2,96
Гнейс	2,59-3,00	2,71
Кристаллический сланец	2,70-3,03	2,80
Песчаник	2,17-2,70	2,42
Известняк	2,37-2,77	2,60
Глина	2,06-2,66	2,38

Таблица 2.1: Плотность некоторых горных пород.

$$A_0 = \frac{F \cdot \tau^2}{2m} \quad (2.5)$$

Наибольшее распространение в сейсморазведке получили вибрационные источники с пневмо, либо гидроприводом [19]. В России распространены также импульсные источники отечественной разработки с электромагнитным приводом [56], которые обеспечивают более стабильную во времени генерацию импульсных сигналов и лучшую управляемость по форме.

Общая масса ударной плиты определяется соотношением:

$$m = m_{\text{п}} + m_{\text{гр}} \quad (2.6)$$

где $m_{\text{п}}$ - масса плиты; $m_{\text{гр}}$ - масса присоединенного грунта, табл. (2.1) [19].

Масса присоединённого грунта оценивается по формуле:

$$m_{\text{гр}} = V_{\text{гр}} \cdot \rho \quad (2.7)$$

где $V_{\text{гр}} = \pi \cdot \frac{d^2}{2} \cdot h$ - объем присоединенного грунта; $d, \text{м}$ - диаметр ударной плиты; $h = 2 \div 2.5, \text{м}$ - глубина присоединенного грунта, $\rho \approx 2000 \text{кг/м}^3$.

$$m = 30 \text{кг} + 640 \text{кг} = 670 \text{кг}$$

$$A_0 = \frac{15 \cdot 10^3 \text{Н} \cdot (5 \cdot 10^{-3} \text{с})^2}{2 \cdot 670 \text{кг}} = 0.28 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Зависимость амплитуды сигнала на выходе сейсмоприемника от частоты описывается уравнением для вынужденных гармонических колебаний с зату-

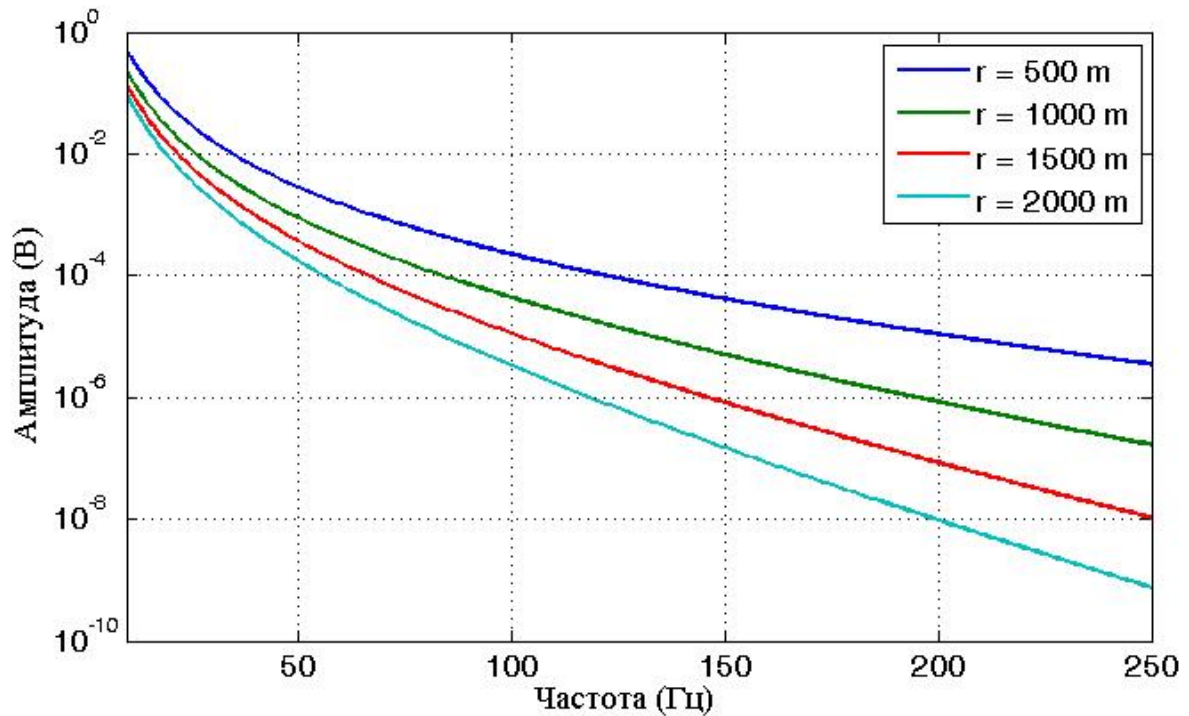


Рис. 2.3: Зависимость амплитуды сигнала от частоты для кристаллических пород.

ханием (2.8) и представлена на рис. (2.3,2.4).

$$A = \frac{A_0}{k \cdot r} \cos(\omega t - k \cdot r) \cdot e^{-\alpha_p(\omega)r} \quad (2.8)$$

Для определения отношения сигнал/шум на выходе сейсмоприёмника и более детальной оценки ослабления сигнала необходимо преобразовать выражение (2.4). Это отношение, для одного приёмника, находится по формуле:

$$q_{п1} = \frac{U_c^2}{U_{ш}^2} \quad (2.9)$$

где U_c - уровень полезного сигнала; $U_{ш} = \sqrt{\sigma_{ш}^2}$ - уровень шума; $\sigma_{ш}^2$ - дисперсия шума.

Для повышения отношения С/Ш в приёмном комплексе используется линейная группа из n сейсмоприёмников, образующая фазированную антенную решётку, которая обеспечивает накопление и корреляцию полезного сигнала путём его повторения. Спектральная плотность шума в каждом сейсмоприёмнике не коррелируется за счёт большого расстояния между ними. Отношение С/Ш для линейной группы приёмников по мощности определяется по формуле:

$$q_{р.n} = \frac{U_c^2 \cdot n^2}{n \cdot \sigma_{ш}^2} = \frac{U_c^2 \cdot n}{\sigma_{ш}^2} = \frac{C}{Ш} \cdot n \quad (2.10)$$

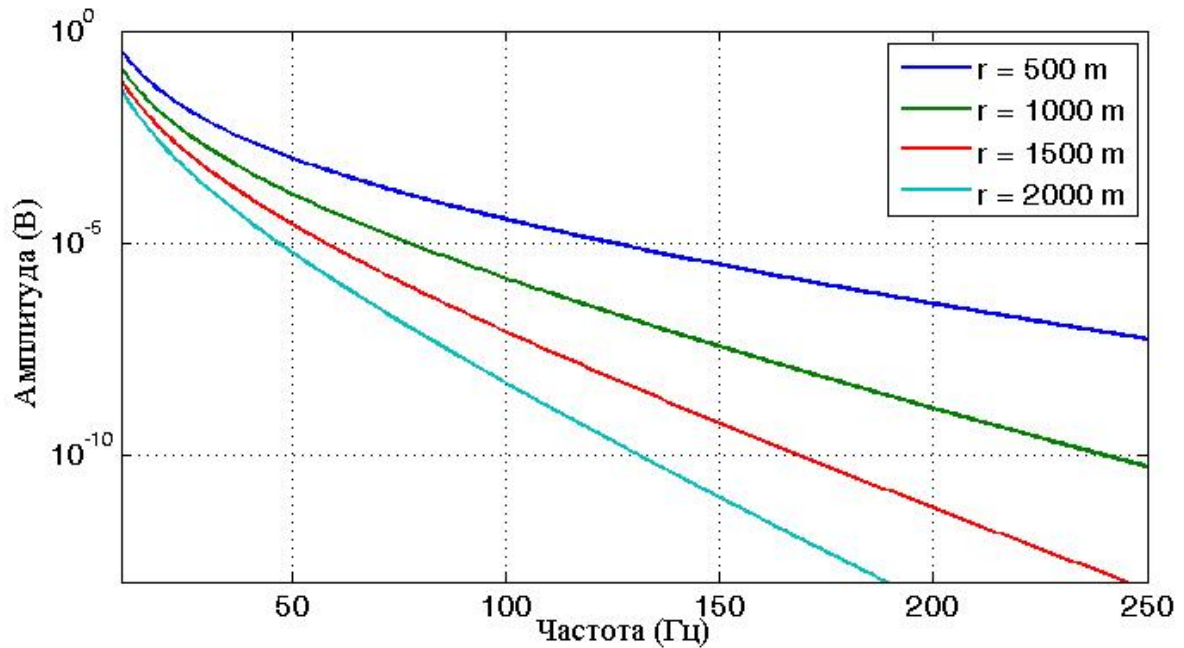


Рис. 2.4: Зависимость амплитуды сигнала от частоты для осадочных пород.

Отношение С/Ш по напряжению для нескольких сейсмоприёмников оценивается по формуле:

$$q_{u.n} = \frac{U_c^2 \cdot \sqrt{n}}{\sigma_{\text{ш}}^2} \quad (2.11)$$

Применяя формулу к выражению 2.4, можно получить зависимость отношения С/Ш от частоты входного сигнала:

$$q_{u.n} = \frac{U_c(\omega)^2 \cdot \sqrt{n}}{U_{\text{ш}}^2} \quad (2.12)$$

Изменение отношения С/Ш будет рассматриваться на интервале частот от 10 до 250 Гц. В зависимости от частоты будут меняться коэффициенты поглощения среды. Коэффициенты поглощения соответствуют различным типам горных пород. α_{P1} — соответствует закону вязкого трения, что характерно для поверхностных слоёв с высоким коэффициентов поглощения (песок, глина, почвенный слой). α_{P2} — соответствует закону упругого последействия, что характерно для твёрдых кристаллических пород с низким коэффициентом поглощения. α_{P3} — соответствует среднему значению, что характеризует осадочные породы с усреднённым коэффициентом поглощения (твёрдые известняки, угольные пласты, осадочные породы малой плотности).

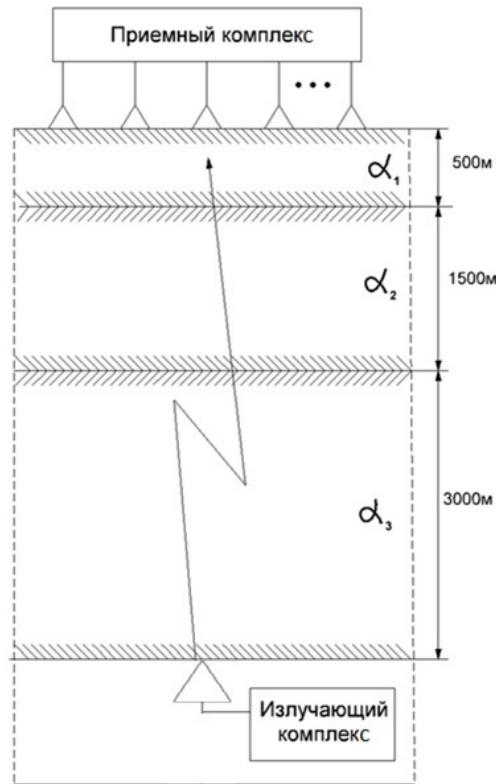


Рис. 2.5: Типовая модель среза горных пород

2.2.3 Расчет ослабления сигнала в типовой модели

Для более детального исследования ослабления сигнала необходимо разделить поглощающие среды на последовательные слои горных пород с соответствующей толщиной и глубиной залегания. При расчёте используется типовая модель среза горных пород для максимальной глубины.

На рис.2.5 приведены размеры и параметры каждой поглощающей среды для первой типовой модели, источник удалён от приёмного комплекса на 5 км. Данная типовая модель предполагает расчёт ослабления сигнала на наихудший случай, так как большинство шахт имеют глубину менее пяти километров. В ней присутствуют плотные кристаллические породы, залегающие на максимальной глубине, осадочные породы, расположенные на средней глубине и поверхностные слои, которые могут содержать глину, песок, грунт или гравий.

Предположительно, два верхних слоя могут сильно ослабить смещение пород при передаче сигнала, так как они обладают высоким коэффициентом поглощения.

Для слоистых сред существенный вклад в энергетику распространения волн может внести отражение от границ раздела.

В изотропных средах, где направлениями волновых векторов совпадают с

направлениями звуковых лучей, законы отражения и преломления принимают привычную форму закона Снелля.

При достаточно малых углах падения все отраженные и преломленные волны представляют собой плоские волны, уносящие энергию падающего излучения от границ раздела. Амплитуды отраженных A_r и преломленных A_t волн в соответствии с граничными условиями линейным образом выражаются через амплитуду A_1 падающей волны, подобно тому, как эти величины в оптике выражаются через амплитуду падающей электро-магнитной волны с помощью формул Френеля. Отражение плоской волны количественно характеризуется амплитудными коэффициентами отражения, представляющими собой отношения амплитуд отраженных волн к амплитуде падающей: $R_a = A_r/A_1$. Амплитудный коэффициент отражения в общем случае комплексен: их модули определяют отношения абсолютных значений амплитуд, а фазы задают фазовые сдвиги отраженных волн. Аналогично определяются и амплитудные коэффициенты прохождения $T_\beta = A_t/A_1$. Перераспределение энергии падающего излучения между отраженными и преломленными волнами характеризуется коэффициентом отражения R_a и прохождения T_β по интенсивности, представляющими собой отношения нормальных к границе раздела компонент средних по времени плотностей потоков энергии в отраженной(преломленной) и в падающих волнах:

$$R_a = \frac{I_r \cos(\theta_r)}{I_i \cos(\theta_i)} = \frac{V_r \cos(\theta_r)}{V_i \cos(\theta_r)} \left| \frac{A_r}{A_i} \right|^2 \quad (2.13)$$

$$T_\beta = \frac{I_t \cos(\theta_t)}{I_i \cos(\theta_i)} = \frac{\rho_2 V_r \cos(\theta_r)}{\rho_1 V_i \cos(\theta_r)} \left| \frac{A_t}{A_i} \right|^2 \quad (2.14)$$

где I_i, I_r, I_t - интенсивности звука в соответствующих волнах, ρ_1 и ρ_2 - плотности соприкасающихся сред. Коэффициент отражения зависит как от акустических свойств соприкасающихся сред, так и от угла падения θ [21] .

При нормальном (т.е. перпендикулярно границе раздела сред) коэффициенты отражения и прохождения монотипных волн вычисляются:

$$R_{21} = \frac{V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} \quad (2.15)$$

$$T_{21} = \frac{2V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} = 1 - R \quad (2.16)$$

Для данной модели необходимо провести расчёт последовательного ослабле-

ния сигнала при прохождении через каждую поглощающую среду.

Расчёт производится по следующим формулам:

$$A_3(\omega) = \frac{A_0}{k_3(\omega) \cdot r_3} \cdot e^{-\alpha_3(\omega)r_3} \quad (2.17)$$

где $A_3(\omega)$ - смещение породы на границе среза толщиной r_3 ;

$$A_2(\omega) = T_{23} \frac{A_3}{k_2(\omega) \cdot r_2} \cdot e^{-\alpha_2(\omega)r_2} \quad (2.18)$$

где $A_2(\omega)$ - смещение породы на границе среза толщиной r_2 ;

$$A_1(\omega) = T_{12} \frac{A_2}{k_1(\omega) \cdot r_1} \cdot e^{-\alpha_1(\omega)r_1} \quad (2.19)$$

где $A_1(\omega)$ - смещение породы на границе среза толщиной r_1 .

После последовательного ослабления смещения пород, при прохождении через все поглощающие среды, сигнал улавливается сейсмоприёмником, который преобразует смещение среды в ЭДС. Зависимость напряжения от частоты и смещения оценивается по формуле:

$$U(\omega) = T_{21} \cdot T_{23} \cdot G \cdot \frac{A_0}{k_1(\omega) \cdot r_1 + k_2(\omega) \cdot r_2 + k_3(\omega) \cdot r_3} \cdot e^{-(\alpha_1(\omega)r_1 + \alpha_2(\omega)r_2 + \alpha_3(\omega)r_3)} \quad (2.20)$$

Для любой типовой модели данную зависимость можно выразить в виде:

$$U(\omega) = T_{21} \cdot \dots \cdot T_{nm} \cdot G \cdot \frac{A_0}{k_1(\omega) \cdot r_1 + \dots + k_{n-1}(\omega) \cdot r_{n-1} + k_n(\omega) \cdot r_n} \cdot e^{-(\alpha_1(\omega)r_1 + \dots + \alpha_{n-1}(\omega)r_{n-1} + \alpha_n(\omega)r_n)} \quad (2.21)$$

где $k_n(\omega)$ – волновое число для каждой поглощающей среды; r_n – протяжённость каждой поглощающей среды.

Зависимости напряжения на выходе сейсмоприёмника от частоты сигнала для первой типовой модели приведены на рис. 2.6

2.2.4 Расчёт параметров линейной группы приемников

Основным частотно зависимым элементом системы является линейная группа сейсмоприёмников, образующая фазированную антенную решётку. Данная конструкция обеспечивает создание узкой диаграммы направленности приёмного комплекса. На рис. 2.7 приведён пример формы диаграммы направленности

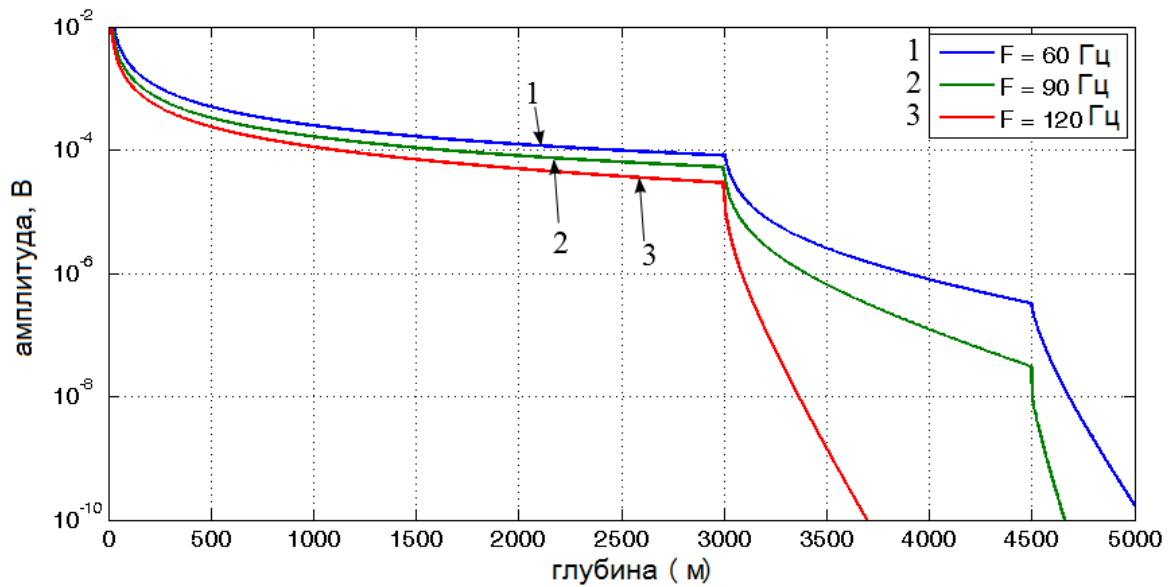


Рис. 2.6: Зависимость амплитуды сигнала от частоты при переходе через слои горных пород

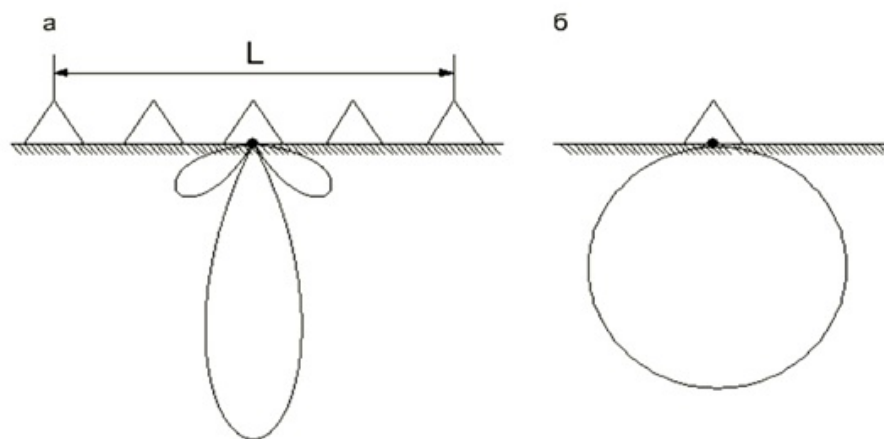


Рис. 2.7: Диаграмма направленности приёмного сейсмического комплекта. а – для линейной группы приёмников, б – для одного приёмника

для одного сейсмоприёмника и линейной группы с длиной L . Из примера видно, что увеличение количества элементов линейной группы сужает диаграмму направленности, что позволит эффективно сканировать пространство и принимать сигнал с лучшим отношением С/Ш [25].

Для подавления некоррелированных помех и определения местоположения излучателя сейсмических сигналов две линейные группы приёмников располагаются ортогонально друг к другу, это позволяет сузить диаграмму направленности. Схематичное изображение данной системы представлено на рис. 2.8. При проверке пространства шахтных выработок на наличие активного источника, работает одна линейная группа, чтобы обеспечить широкий угол сканирова-

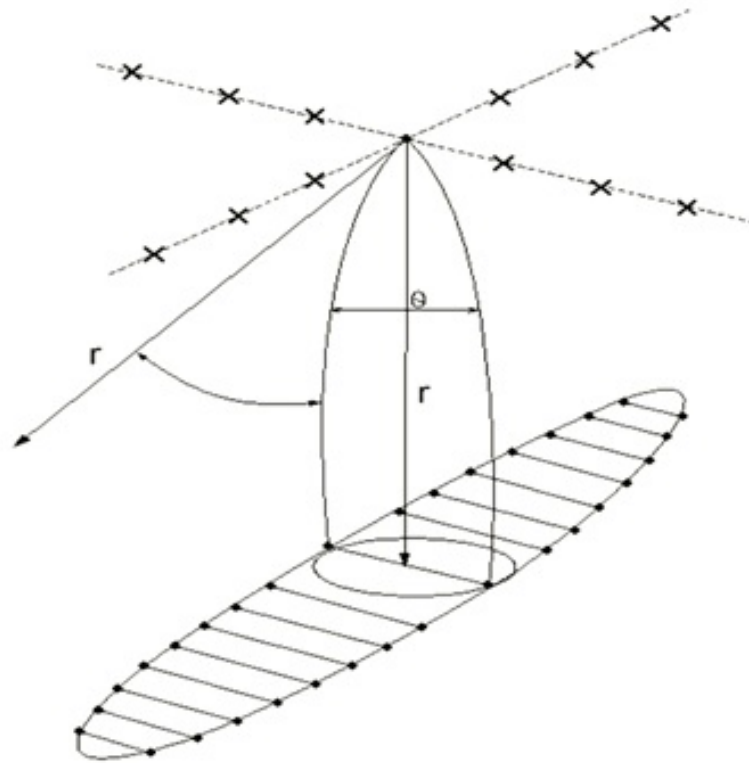


Рис. 2.8: Схематичное изображение ортогональных линейных групп сейсмоприёмников.

ния. При попадании активного излучателя в зону сканирования, дополнительно начинает работу вторая линейная группа приёмников, это позволяет создать узкую диаграмму направленности, что обеспечит высокий уровень отношения С/Ш. Основными параметрами диаграммы являются коэффициент направленного действия Q и разрешающая способность по угловым координатам θ . Эти параметры зависят от длины волны и свойств поглощающих сред, а также от используемых частот.

Длина продольной волны определяется по формуле:

$$\lambda_p = \frac{v_p}{f} \quad (2.22)$$

Соответственно, длина линейной группы приёмников определяется с учётом того, что при помощи неё создаётся фазированная антенная решётка. Для расчёта длины необходимо определить шаг решётки. Максимальное значение шага решетки, определяется из условия подавления дифракционных максимумов, для выделения одного максимума шаг решётки не должен превышать $\lambda_p/2$. При этих условиях длина линейной группы и апертура определяются по формуле:

$$L_\alpha = n \cdot d = \frac{n \cdot \lambda_p}{2} \quad (2.23)$$

Параметры линейной группы сейсмоприёмников	Рудная шахта. Кристаллические плотные породы, глубина 2,1 км.	Угольная шахта. Породы средней плотности, глубина 1,6 км.
Максимальная эффективная частота сейсмического сигнала, Гц	100	55
Длина волны сейсмического сигнала, м	60	82
Шаг линейной группы, м	30	41
Длина линейной группы, м	300	410
КНД	62.8	62.8

Таблица 2.2: геометрические параметры линейной группы сейсмоприёмников для двух типовых моделей.

где n - количество сейсмоприемников [25].

Коэффициент направленного действия:

$$D = 4\pi \frac{L_\alpha}{\lambda_p} \quad (2.24)$$

Геометрические параметры фазированной решётки представлены в таблице 2.2

2.3 Разработка протокола передачи данных

2.3.1 Модуляция сообщения

При разработке протокола передачи информации первоначально рассматривался вариант рис.2.9, с использованием псевдо-случайных кодовых последовательностей, каждая из которых отвечала за заранее определенное сообщение. [32] В данном способе генератор сейсмических волн излучает одиночные импульсы, а информационная составляющая состоит в изменяющейся между ними задержки. Очевидно, что чем длиннее база последовательности, тем лучшее соотношение сигнал/шум можно получить после корреляционной обработки на выходе приемника. С другой стороны снижается скорость передачи информации и расходуется большее количество энергии на передачу одного сообщения.

Для изучения возможности реализации корреляционного метода передачи информации и определения максимального расстояния, на котором можно корреляционной обработкой детектировать одиночный импульс, были проведены исследования на руднике глубиной 800 метров. Результат оказался неубедительным, поскольку среда имеет переходную характеристику полосового фильтра, а

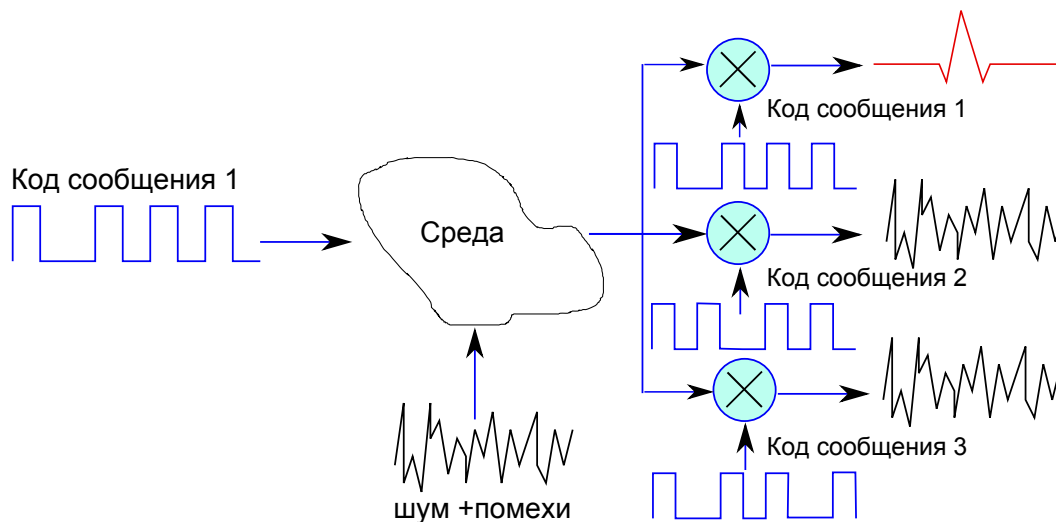


Рис. 2.9: Алгоритм корреляционной обработки сообщений

одиночный импульс возбуждения имеет широкий спектр, следовательно, опорный сигнал, снятый в непосредственной близости от источника сильно отличался от принятого по составу спектральной плотности, а естественные шумы шахты, в полосе сигнала, лишь усугубляли ситуацию.

Для снижения зависимости качества передачи от формы частной характеристики канала было принято решение использовать узкополосный сигнал, с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ), как частный случай амплитудной модуляции с подавленной несущей (SSB). Преимущество данной модуляции перед амплитудной (АМ) в том, что вся энергия излучателя используется на передачу информационной части сигнала, в то время как в АМ на излучение несущей расходуется до 60 % энергии передатчика [33]. Полезный энергетический эффект при переходе от АМ к передаче одной боковой полосы возрастает в 8 раз неизменной установочной мощности передатчика. При приеме обеих полос возрастает в два раза мощность шумов приемника и во столько же раз напряжение сигналов от двух боковых полос. В сравнении с частотной модуляцией (ЧМ) приемники сигналов с ОФМ отличаются большей помехоустойчивостью. Это обусловлено тем, что спектр ОФМ в два раза уже, чем сигнала ЧМ. Кроме того, при ОФМ ослабляются помехи, не совпадающие по фазе с началом и концом передачи сигнала. В результате выигрыш по мощности перед ЧМ достигает 2 раз. [34]

Оценить требуемое отношение сигнал/шум для фазовой телеграфии можно через требуемую вероятность ошибки. При $q \gg 1$ справедливы следующие приближённые соотношения:

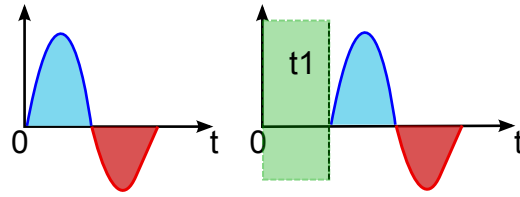


Рис. 2.10: Базис ОФМ

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2}e^{-q} \quad (2.25)$$

Исходя из этого, требуемое отношение С/Ш для фазовой телеграфии при $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$ определяется по формуле: [38]

$$q_{\text{ОФМ}} = -\ln(2P_{\text{ош}}) = 6.21 \approx 7 \quad (2.26)$$

Так как конструкция сейсмоприемника не позволяет излучать два однополярных импульса возбуждения непосредственно друг за другом, то для смены фазы сигнала на 180 град, вводится задержка $t1$, с длительностью соответствующей полуволне колебания. Базис посылки представлен на рис.2.10.

Здесь синим цветом выделена полуволна образованная под действием электромагнита, красным - от пружины. С использованием ОФМ может возникнуть неоднозначность при приеме кодовых посылок, например "1011"и "0100". Для ее разрешения в протокол введен старт-бит: "11011"и соответственно "10100". В результате сообщение примет вид показанный на рис.2.11:

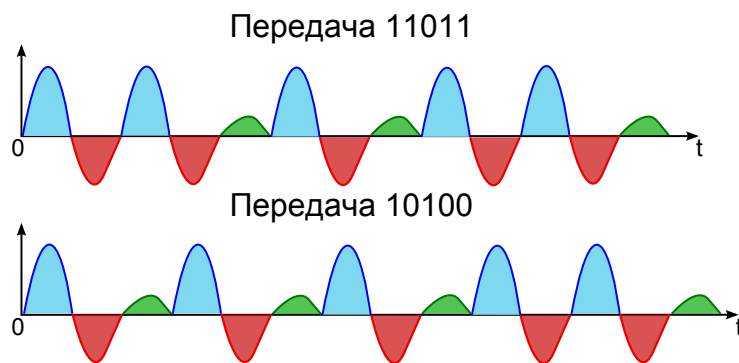


Рис. 2.11: Кадр передачи сообщений

В реальных условиях, для достижения достаточной помехоустойчивости и скорости фазовой автоподстройки приемника, бит информации должен содержать несколько периодов, число которых находится из соображения оптималь-

ности. Временная и частотная характеристика 9-битового пакета информации показана на рис.2.12. Для проведения моделирования был выбран сигнал с частотой модуляции $F_m = 12$ Гц, при несущей частоте $F_c = 120$ Гц. Частота дискретизации сигнала соответствовала $F_d = 10000$ Гц, а время передачи одного байта $T = 0.75$ сек. Для приближения к реальным условиям амплитуда положительного колебания выбиралась не равной амплитуде отрицательного.

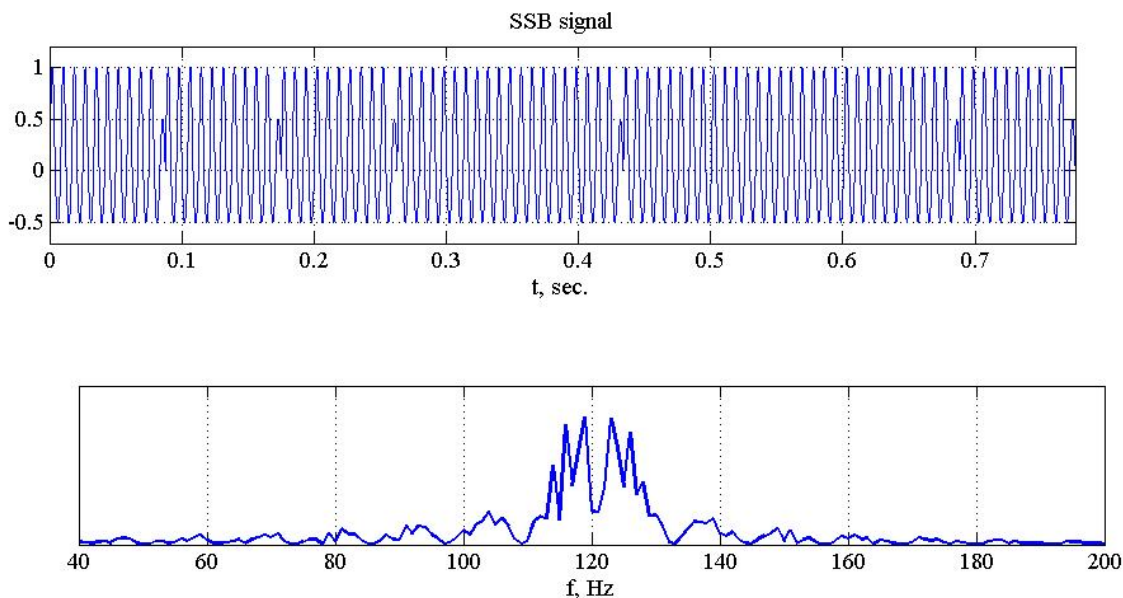


Рис. 2.12: Вид SSB во временной и частотной области

2.3.2 Демодуляция ОФМ-сигнала

Демодуляция сигналов с ОФМ осуществляется путем восстановления несущей - умножая входной сигнал на опорный с гетеродина, а затем фильтром нижних частот подавить составляющую на удвоенной частоте. Так как начальная фаза входного сигнала не совпадает с фазой сигнала гетеродина, необходимо ввести автоматическую подстройку фазы.

Для удобства описания работы ФАП обычно выделяют следующие основные блоки: фазовый детектор (ФД), фильтр низких частот (ФНЧ) и управляемый подстраиваемый генератор (ПГ). Подобное разделение на функциональные блоки часто оказывается условным, потому что в конкретной физической реализации ФАП не всегда возможно выделить четкие границы между этими блоками. Работа ФАП заключается в автоматической подстройке фазы (частоты) сигнала управляемого генератора к фазе (частоте) сигнала эталонного генератора (ЭГ). Эталонный генератор обычно является высокостабильным, и частота его сигнала принимается постоянной. Сигналы с подстраиваемого и эталонного ге-

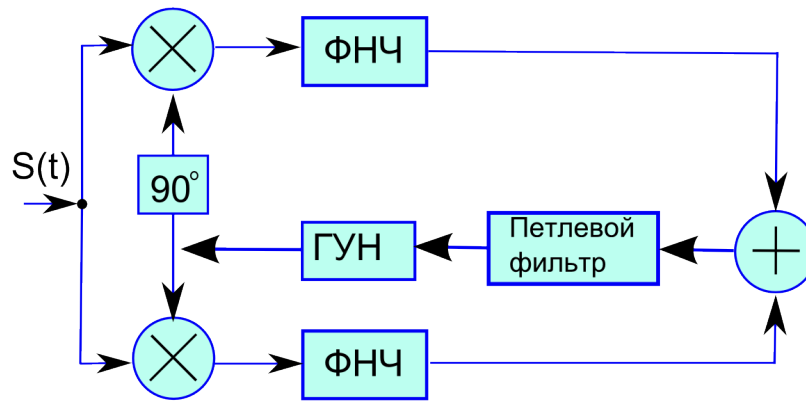


Рис. 2.13: Детектор Костаса

нераторов поступают на фазовый детектор — нелинейный элемент, позволяющий получить сигнал расфазировки, соответствующий разности фаз входных сигналов.

Полоса захвата фазы должна иметь два устойчивых полюса. Существует много решений этой задачи, в этой работе [33] был использован детектор Костаса, структурная схема которого изображена на рис.2.13.

На рис.2.14 показана работа фазовой автоподстройки детектора Костаса, где красным цветом показан входной сигнал $S(t)$, синим сигнал с выхода ГУН. Сигнал об ошибке полученный с сумматора задает управляющее напряжение на генератор управляемый напряжением и подстраивает его под фазу входного сигнала. При смене фазы входного сигнала на π , *рад.* фазовая автоподстройка продолжает следить за входным сигналом, но уже в противофазе.

Сигнал полученный в результате перемножения входного сигнала на опорный рис.2.15, необходимо детектировать, пропустив через фильтр нижних частот (ФНЧ). В качестве ФНЧ используется интегратор с постоянной времени интегрирования равной длительности одного бита информации.

Задав определенный порог срабатывания, зависящий от соотношения сигнал/шум, можно провести считывание входных данных. В реальных условиях помеха может обладать достаточной мощностью, чтобы вызвать ложную интерпретацию сигнала, поэтому функция принятия решений была возложена на корреляционную обработку, с заранее известными копиями сигнала.

2.3.3 Корреляционная обработка сигнала

Для реализации корреляционной обработки сигнала в решающем устройстве приемника, необходимо, чтобы используемые в протоколе обмена коды, обла-

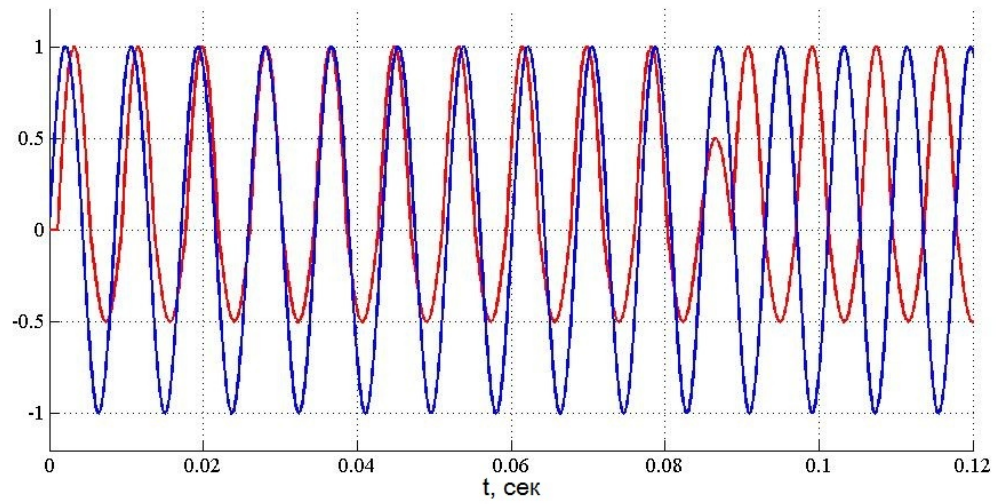


Рис. 2.14: Фазовая автоподстройка

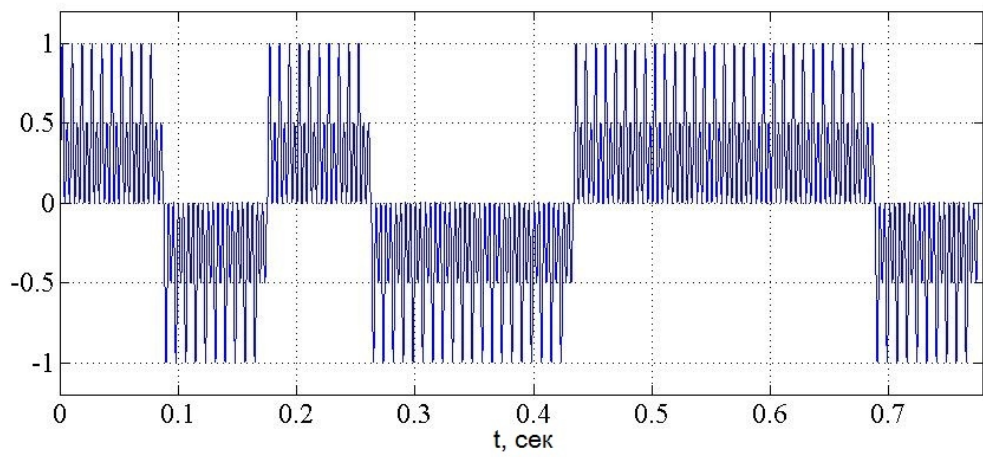


Рис. 2.15: Результат перемножения входного сигнала на опорный

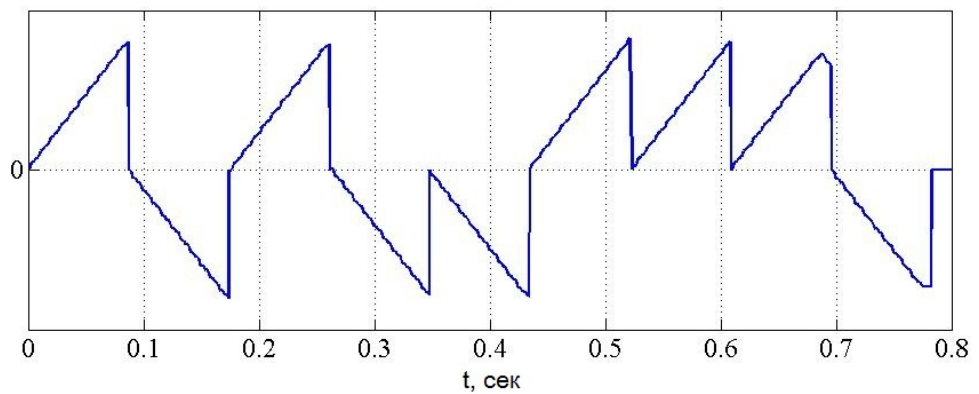


Рис. 2.16: Детектирование сообщения

дали хорошо выраженным максимумом АКФ и ВКФ, а число кодовых последовательностей было достаточно для передачи всех комбинаций сообщения.

В системах связи с 60-х годов для этих целей используют в различных применениях функции Уолша. Существуют различные определения систем Уолша: по теореме умножения, при помощи функций Радемахера, на сдвиговых регистрах, однако при относительно небольшом объеме $N \leq 64$ удобнее воспользоваться матрицами Адамара [41], которые определяются следующим символическим равенством:

$$H_{2N} = \begin{vmatrix} H_N & H_N \\ H_N & -H_N \end{vmatrix} \quad (2.27)$$

где H_N - матрица Адамара порядка N , а H_{2N} - матрица Адамара порядка $2N$. Полагая $H_1 = 1$, из (2.27) получаются матрицы порядка 2, 4, 8:

$$H_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}, \quad H_4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

$$H_8 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} \quad (2.29)$$

Функции Уолша являются ортогональными, однако корреляционные свойства этих систем нельзя признать удовлетворительными. Большинство АКФ и ВКФ последовательностей Уолша имеют большие боковые пики [36]. Тем не менее на основе систем Уолша можно построить производные (составные) системы сигналов, которые обладают хорошими корреляционными свойствами.

Производным сигналом называется сигнал, полученный в результате перемножения (суммирования по модулю 2) двух сигналов. Среди производных систем особое значение имеют системы, построенные следующим образом. В качестве основы используется некоторая система сигналов, корреляционные свойства которой не вполне удовлетворяют требованиям корреляционным функциям, но которая обладает определенными преимуществами с точки зрения простоты формирования и обработки. Такая система называется исходной. Затем

выбирается сигнал, который обладает высокими определенными свойствами. Такой сигнал называется производящим. Умножая производящий сигнал на каждый сигнал исходной системы, получаем производную систему. Производящий сигнал лучше выбирать так, чтобы производная система обладала хорошими корреляционными свойствами, т.е. АКФ имела минимальные боковые пики [37].

Рассмотрим в качестве исходной систему Уолша. В этом случае производящие сигналы должны иметь хорошие АКФ. Кроме того, производящий сигнал должен иметь столько же элементов, что и исходные сигналы, т.е. число элементов $N = 2^z$, где z - целое число. Этим условиям в целом удовлетворяют псевдо-случайные последовательности (ПСП), в частности сегменты (отрезки) M - последовательностей [36].

Объем N исходной системы выбирается исходя из требования к количеству передаваемых сообщений. Для систем объемом $N = 7$, можно использовать оптимальную производящую последовательность с уровнем боковых лепестков АКФ $V_{max} = 1$. Этим свойством обладает 7-символьный код Баркера. Кодовые последовательности обладающие этим свойством, для числа символов, большего 13, не найдены [37]. Объем производной системы равен объему системы Уолша, поэтому 7-символьный код Баркера - 1110010 необходимо дополнить символом 0, разместив его в начале кодовой группы - 01110010. При этом число 1 и 0 кодовой комбинации будет одинаковым и будем считать ее сегментом ПСП.

В литературе [37] были рассчитаны все корреляционные функции большого числа производных сигналов. Для сравнения уровни боковых лепестков V_{max} АКФ производящих систем (П) и системам Уолша (У) приведены в табл. [2.3].

N	8	16	32	64
У	7	15	31	63
П	2	9	17	25

Таблица 2.3: Сравнение уровня боковых лепестков АКФ произведенных систем (П) с системами Уолша (У).

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

В теории систем передачи дискретной информации известно [38,39], что наиболее помехоустойчивой является обработка кодированных сообщений «в целом». Теорема Финка [38] утверждает, что:

$$p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq p_4, \quad (2.31)$$

где p_1 — вероятность того, что при поэлементном приеме кодовая комбинация принята с ошибкой; p_2 — вероятность того, что при поэлементном приеме произошла неисправленная ошибка; p_3 — вероятность того, что кодовая комбинация принята ошибочно при оптимальном приеме «в целом»; p_4 — вероятность того, что при поэлементном приеме возникла необнаруженная ошибка.

Таким образом, при использовании декодирования «в целом» всей принятой кодовой последовательности можно реализовать исправляющую способность декодера на уровне обнаруживающей способности кода, что обеспечит существенный рост помехоустойчивости при сравнительно коротких кодах [40].

Строки приведенной матрицы являются корреляционными кодами протокола. Каждому коду присваивается заранее оговоренное значение единое как для передатчика, так и для приемника. По команде оператора передатчик излучает одну из кодовых последовательностей, а приемник, после первичной демодуляции сигнала, приведенной выше (рис.2.16), проводит построчную корреляцион-

ную обработку с приведенной матрицей. Номер строки с максимальным числом говорит о номере принятого кода.

Если для обнаружения кодового сообщения необходима ярко выраженная АКФ, то достоверность детерминирования принятого сигнала зависит от свойства ВКФ кодов, образующих базис канала связи.

В таблице (2.4), показаны максимумы функций, полученных при взаимной корреляции строк приведенной матрицы (2.30).

№ кода	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
max	5	7	5	7	4	7	7	5

Таблица 2.4: Максимумы ВКФ приведенных кодов, (пик АКФ равен 8)

Здесь видно, что для кодов №2,4,6,7, максимальное значение ВКФ отличается от АКФ, всего лишь на 1, что повышает риск неправильной трактовки принятого сигнала. При ближайшем рассмотрении упомянутых кодов видно, что они идентичны, и различаются друг от друга тем, что сдвинуты на одну позицию:

код №2: 1 1 -1 1 1 -1 -1 -1

код №7: 1 -1 1 1 -1 -1 -1 1

код №4: 1 1 1 -1 1 -1 1 1

код №6: 1 1 -1 1 -1 1 1 1

Убрав из состава базовых, коды №6,7, число комбинаций сообщений, при базе в 8 бит, сокращается до 6, но существенно увеличивается различие ВКФ - см. таблица (2.5).

№ кода	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
max	4	5	4	4	4	-	-	5

Таблица 2.5: Максимумы ВКФ приведенных кодов, (пик АКФ равен 8)

2.4 Компьютерная модель сейсмоакустической системы

Для компьютерного моделирования алгоритмов работы приемо-передатчика сейсмического канала передачи сообщений в горных выработках была разработана модель с использованием среды программирования Matlab. На рисунке (2.18) представлен внешний вид интерфейса модели.

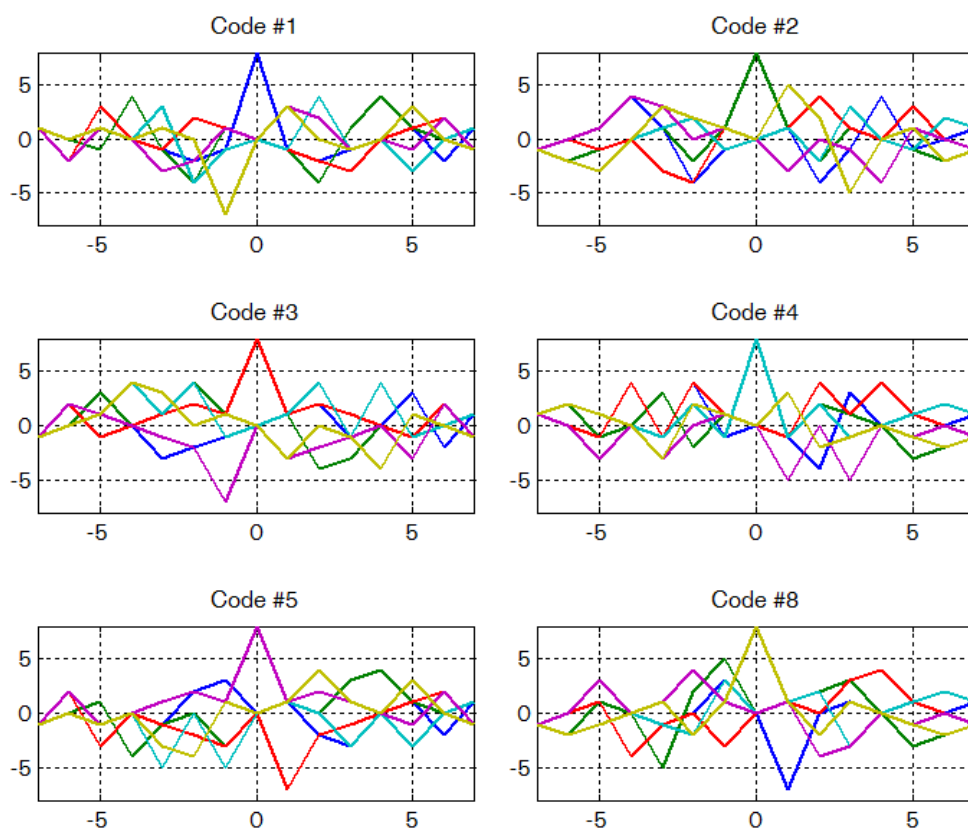


Рис. 2.17: Взаимно-корреляционные функция базовых последовательностей

Основные возможности разработанной программной модели:

- Работа с реальными данными, представленными в формате wav-файла;
- Генерация простых гармонических и сложных сигналов (ФМ на базе функций Уолша и M-последовательностей) со следующими параметрами: несущая частота сигнала, количество символов в сигнале ФМ и длительность символа, длительность сигнала, частота дискретизации;
- Настройка полосы пропускания и коэффициента подавления цифровых фильтров;
- Настройка параметров детектора Костаса;
- Визуализация принятого сигнала во временной и частотной областях;

При обработки реальных данных возникает потребность в увеличении быстродействия выполняемых операций. Для ускорения корреляционной обработки, использования цифровых фильтров высокого порядка и представления больших объемов данных численных и натуральных экспериментов в MATLAB предлагается использовать технологию CUDA (вычисления на графических процессорах) [42]. В работе использовался распространяющийся под открытой лицензией плагин для Matlab с поддержкой CUDA [43].

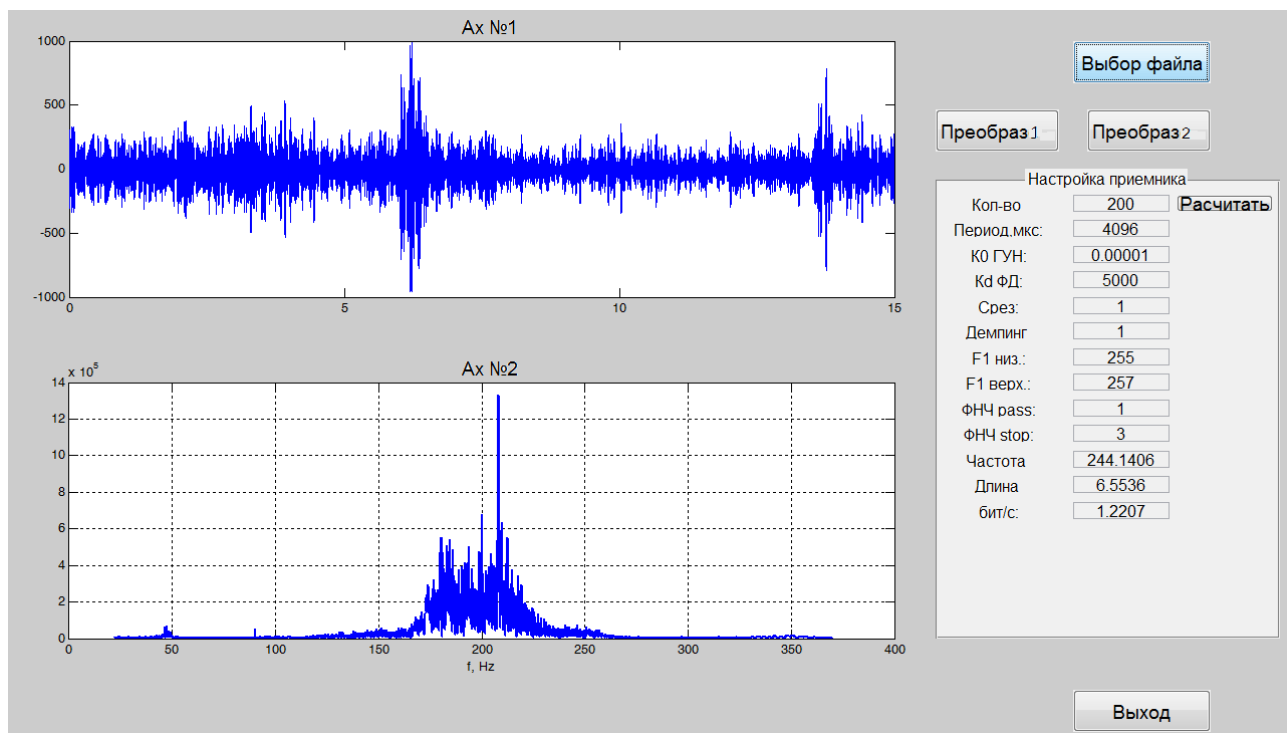


Рис. 2.18: Внешний вид интерфейса модели

Выводы

1. Расчетным путем показана возможность реализации сейсмического канала передачи информации через горную породу на дистанцию более километра, из ограниченного подземного пространства с потребляемой мощностью сейсмического излучателя до 2 кВт от аккумуляторного питания. Дальность связи зависит от плотности среды и энергетики канала.

2. Управляемыми факторами, позволяющими адаптировать параметры передачи информации, являются время передачи, рабочая частота несущей сейсмического канала, распределенный прием несколькими сейсмическими приемниками и усовершенствованная система кодирования.

3. Показано, что наиболее помехоустойчивой из физически реализуемых в сейсмических волнах модуляцией является относительно-фазовая, которой сообщения кодируются в базисе кодов Уэлша. Для принятия решения используется корреляционная обработка принятого сигнала с копиями возможных сигналов.

Глава 3

Проблемы аппаратной реализации

3.1 Электромеханический привод передатчика

3.1.1 Обоснование выбора и метод расчета излучателя сейсмических волн

Источник сейсмических колебаний, для передачи сигналов, разработанных в предыдущей главе, должен обладать следующими свойствами:

- максимальное усилие не менее 1000 Н;
- возможность излучать гармонические сигналы 40-150 Гц;
- максимальная идентичность положительной и отрицательной полуволны;
- потребляемая мощность не более 2 кВт.

Для получения мощного механического импульса применяются различные по своей природе способы: взрывчатые вещества, гидропневматические системы, инерционные и электрические. Электрические системы выделяются относительной простотой конструкции и управления. Они в свою очередь делятся на электромагнитные, электродинамические и индукционно-динамические. [28,56] Общей чертой перечисленных систем является наличие, хотя бы одной катушки индуктивности для создания магнитного поля.

Индукционно-динамические двигатели (ИДД) применяются в научных исследованиях и промышленности, где используются электромеханические системы ударно-импульсного действия.

Возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЭНЕ) индуктор ИДД индуцирует в электропроводящем массивном якоре ток, который обуславливает возникновение электродинамических усилий (ЭДУ), между индуктором и якорем, передаваемых от последнего на ускоряемый исполнительный элемент. [45]

Традиционно ИДД выполняются, как правило, без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено быстрым действием рабочих процессов, значи-

тельным уровнем возбуждаемых электромагнитных полей и ограничениями по массо-габаритным показателям. [44]

Несмотря на то, что ИДД позволяют получать наибольшее усилие, на единицу площади, сравнительно с другими электрическими системами, за счет отсутствия ограничений магнитопроводящих материалов ферритовых сердечников, их применение сейсмической связи мало перспективно. Главная проблема заключается в сложности получать сигнал частотой от 40 до 150 Гц, наиболее открытой для распространения сейсмических волн, немаловажную роль играют проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за повышенных требований по безопасности к шахтному оборудованию.

Электродинамические двигатели. Электродинамический метод основан на законе Ампера, т.е. силе действующей на проводник с током в магнитном поле. Изменяя направление тока в проводнике можно управлять направлением силы, что позволяет генерировать разнонаправленные сейсмические колебания, необходимые для фазовой манипуляции. [46]

$$F = BIl \sin \varphi \quad (3.1)$$

Механическое взаимодействие контуров с током под действием силы Ампера (3.1) можно представить следующим образом: один контур создает магнитное поле, которое воздействует на проводники с током второго контура и наоборот. Таким образом, задача анализа взаимодействия контуров расчленяется на две: первая – расчет магнитного поля, создаваемого первым контуром в месте расположения витков второго, и вторая – определение силы, действующей на второй контур. Задача расчета магнитного поля решается с помощью закона Био–Савара–Лапласа, который дает возможность определить индукцию магнитного поля $d\vec{B}$, создаваемого элементом $d\vec{l}$ проводника с током I в точке А, находящейся на расстоянии \vec{r} от $d\vec{l}$:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^3} \quad (3.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{н}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды (для воздуха – $\mu \approx 1,0$). Векторное произведение $[d\vec{l} \cdot \vec{r}]$ определяет направление $d\vec{B}$.

Определив с помощью закона Био–Савара–Лапласа (3.2) вектор $d\vec{B}$, для каждого элемента контура. Поскольку катушка состоит из N одинаковых витков, интегрирование проведем по элементам одного витка и результат умножим

на число витков:

$$d\vec{B} = N \cdot \oint_l \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^3} \quad (3.3)$$

Картина магнитного поля кругового контура изображена на рис. 3.1.

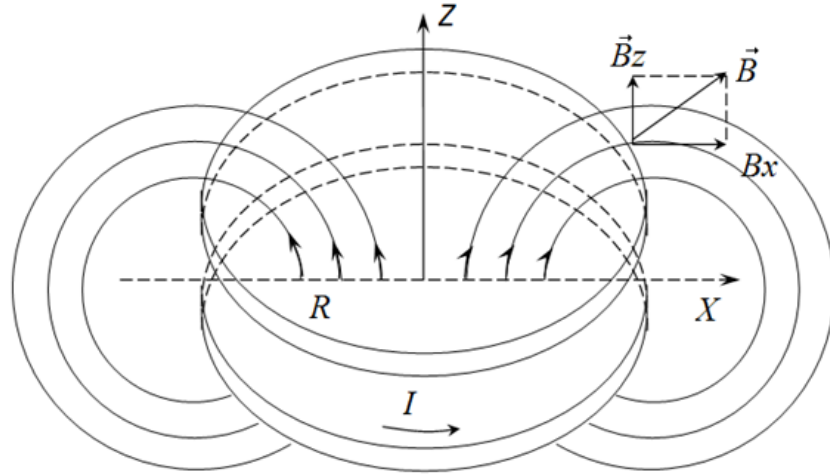


Рис. 3.1: Магнитное поле кругового контура

Видно, что поле симметрично относительно оси контура и индукция имеет две составляющие: B_Z – перпендикулярную плоскости контура и B_X – параллельную плоскости контура. Сила, возникающая под воздействием B_Z , направлена перпендикулярно оси Z и действует на "разрыв" катушки, следовательно ей можно пренебречь. Катушки расположены соосно с минимально возможным расстоянием между ними. Результат интегрирования при $x = R$ (R – радиус контура) и $Z = d$ (расстояние между центрами проводников катушек) дает величину:

$$B_X = N \cdot \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \cdot \frac{d}{R\sqrt{4R^2 + d^2}} \left[\frac{2R^2 + d^2}{d^2} E - K \right] \quad (3.4)$$

здесь E и K – полные эллиптические интегралы первого и второго рода (специальные функции, зависящие от величин R и d). [47]

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\beta}{(1 - k^2 \sin^2 \beta)^{0.5}} \quad (3.5)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \beta)^{0.5} d\beta \quad (3.6)$$

где k и β соответственно: $k^2 = \frac{4R^2}{4R^2 + d^2}$, $\beta = \frac{\pi - \alpha}{2}$.

Для вычисления значения этих функций можно воспользоваться степенными рядами:[49]

$$K = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{k^2}{4} + \frac{9}{64}k^4 + \frac{50}{8^3}k^6 + \frac{1225}{4 \cdot 8^4}k^8 + \dots \right) \quad (3.7)$$

$$E = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{k^2}{4} - \frac{3}{64}k^4 - \frac{10}{8^3}k^6 - \frac{175}{4 \cdot 8^4}k^8 + \dots \right) \quad (3.8)$$

Увеличить напряженность магнитного поля возможно зашунтировав часть пути силовых линий магнитопроводящей плитой, установленной под катушкой намагничивания. Необходимо помнить об ограничениях накладываемых данным способом, таких как максимальная индукция насыщения материала, не превышает 2 Тл, к тому же магнитная проницаемость μ ферромагнетиков не является постоянной величиной, она сильно зависит от напряженности H внешнего поля. Типичная зависимость $\mu(H)$ приведена на рис. 3.2.

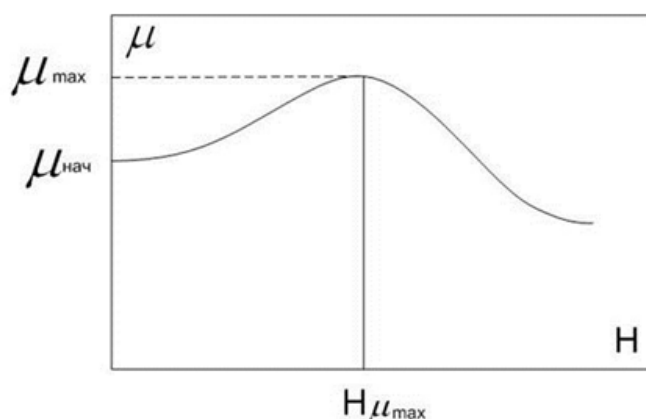


Рис. 3.2: Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля

Для проверки приведенных формул был изготовлен стенд, состоящий из двух катушек, накопительного конденсатора емкостью 10 000 мкФ, тиристора и источника тока. Конструкции катушек идентичны и представляют собой 7 витков намотанных на пластиковом каркасе внутренним диаметром 60 мм, прямоугольным проводом сечения 3×1 мм.

Индуктивность катушки прямоугольного сечения может быть найдена по формуле [72]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d \cdot \Phi \quad (3.9)$$

где N - число витков катушки; d - ее средний диаметр, Φ - величина, значение которой можно определить по кривым рис.3.4. На этом рисунке по оси абсцисс отложены значения величины $\rho = r/d$, а по оси ординат - значения величины

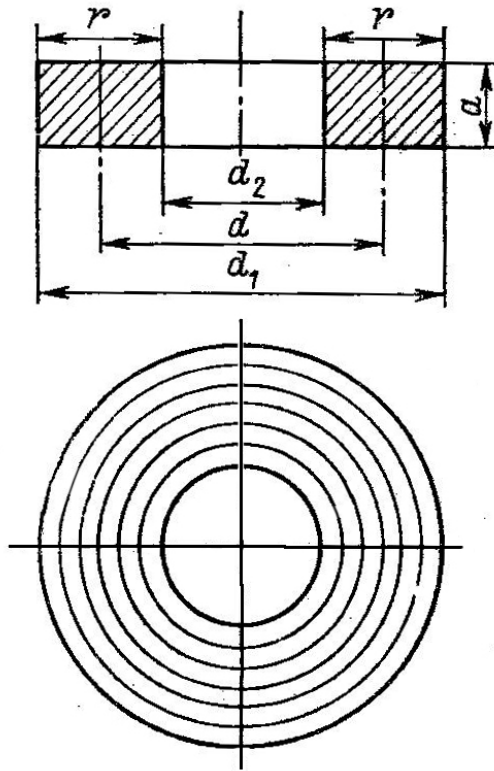


Рис. 3.3: Схематичное изображение плоской катушки

$\alpha = a/d$, где a и r - аксиальный и радиальный размеры поперечного сечения катушки. Значения величины Φ определяются путем интерполирования - по значениям, указанным на соответствующих кривых.

$$\rho = \frac{8 \cdot 10^{-3} \text{М}}{68 \cdot 10^{-3} \text{М}} = 0,117$$

$$\alpha = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{М}}{68 \cdot 10^{-3} \text{М}} = 0,044$$

$$\Phi = 18$$

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}}}{4\pi} \cdot 7^2 \cdot 68 \cdot 10^{-3} \text{М} \cdot 18 = 6 \cdot 10^{-6} \text{Гн}$$

Реальные измерения катушек дали результат 6.7 мкГн, ошибка порядка 6 % не является принципиальной в оценочных расчетах и подтверждает достоверность расчетов. Необходимо обратить внимание, что при встречном включении катушек их суммарная индуктивность равна: [49]

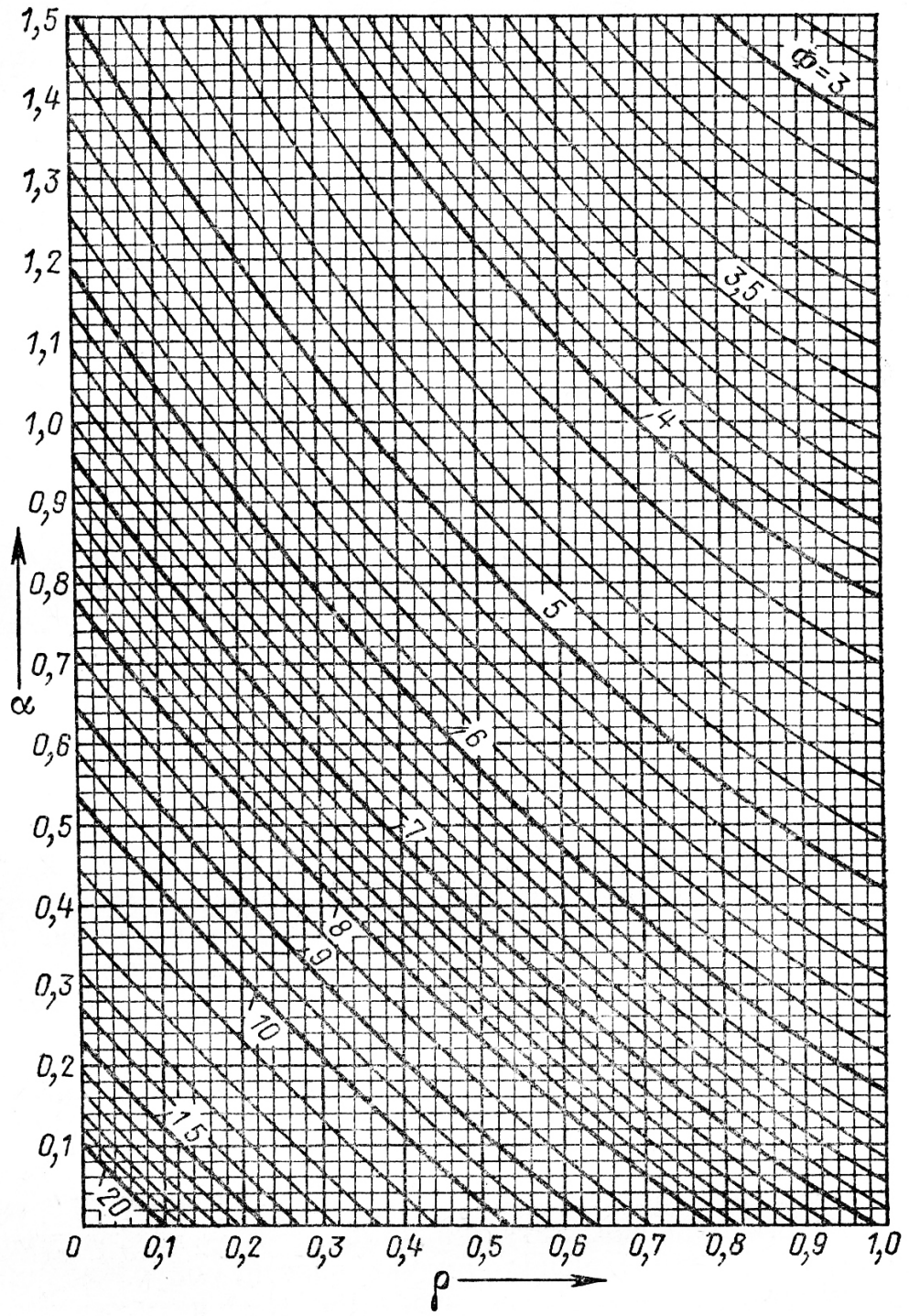


Рис. 3.4:

$$L_{sum} = L_1 + L_2 - 2M \quad (3.10)$$

где M - взаимная индуктивность.

Взаимная индуктивность сильно зависит от расстояния между катушками, что подтверждает проведенный эксперимент. Из рис. 3.5 видно, что при минимальном расстоянии между катушками суммарная индуктивность уменьшилась более чем в 3 раза до 2.2 мкГн.

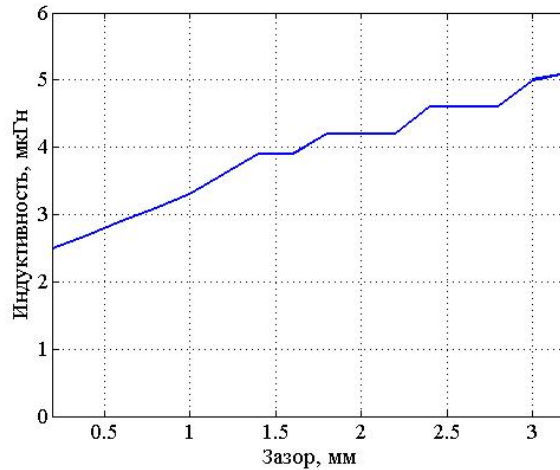


Рис. 3.5: Зависимость суммарной индуктивности от расстояния

Измерив, индуктивность двух встречно включенных катушек, зная емкость конденсатора и его начальное напряжение, можно рассчитать усилие возникающее на силовой катушке и его длительность.

Для создания модели эпюр токов и напряжения применяется расчет переходных процессов в программе LTSpice [52].

Так как полученную модель планируется сопоставлять с реальным экспериментом, необходимо учесть неидеальность элементов. Омическое сопротивление проводов катушек по постоянному току зависит от материала, из которого сделаны проводники(ρ), от площади их сечения (S) и длины(l):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3.11)$$

$$R = \frac{1.72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м} \cdot 3.2 \text{ м}}{3 \text{ мм}^2} = 20 \text{ мОм}$$

Сопротивление катушек по постоянному току равно 20 мОм, к этой величине стоит прибавить 10 мОм, которые добавляет внутреннее сопротивление открытого тиристора и соединительных проводов. Результат моделирования приведен

на рис.3.6, красным цветом отображено напряжение конденсатора, а синим ток через катушки.

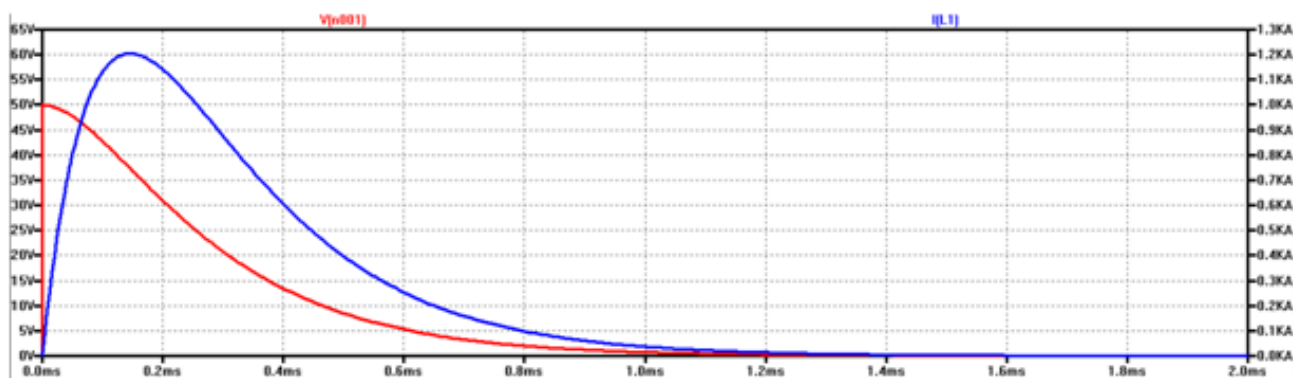


Рис. 3.6: Эпюры тока и напряжения в контуре.

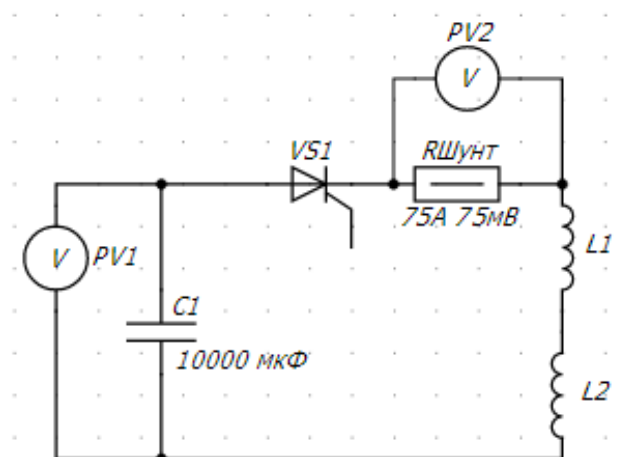


Рис. 3.7: Электрическая схема эксперимента.

Испытания на лабораторном стенде рис. 3.7 показали, что максимальное значение тока рис. 3.8 достигает 800 А, причем ток нарастает до 200 А практически мгновенно, что говорит о наличии в системе активных потерь. При удалении катушек друг от друга явление пропадает. Объясняется это взаимными наводками на проводники катушек. В реальных условиях потери в проводах зависят не только от сопротивления по постоянному току. Дополнительные потери вносит скин-эффект и так называемый эффект близости [53].

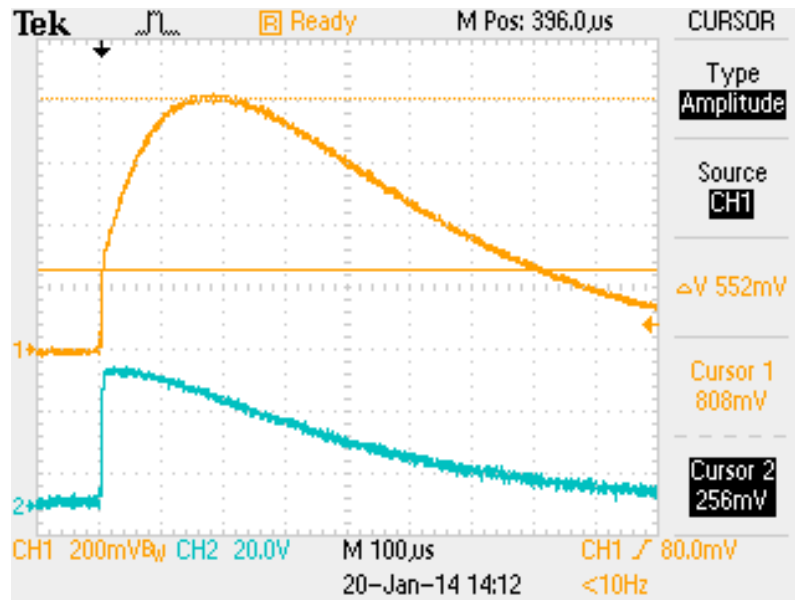


Рис. 3.8: Осциллограмма тока и напряжения.

Скин-эффект уменьшает эффективную площадь сечения проводника вследствие того, что переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое. Глубина скин-слоя:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \mu_0 f}} \quad (3.12)$$

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1.72 \cdot 10^{-8} \text{Ом} \cdot \text{Ом}}{\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}} \cdot 10 \cdot 10^3 \text{Гц}} = 0.65 \text{мм}$$

Учитывая размеры провода 3×1 мм, влиянием скин-эффекта можно пренебречь.

Эффект «близости» заключается в том, что под воздействием магнитного поля от соседних витков в проводе катушки возникают вихревые токи. Очевидно, что сопротивление переменному току под воздействием эффекта близости дополнительно возрастает. Эффект уменьшается при уменьшении «близости», т.е. при увеличении шага между витками. Надо иметь ввиду, что как эффект «близости» так и скин-эффект, являются двумя аспектами одного и того же явления - взаимодействия ВЧ тока с магнитным полем. В связи с крайней сложностью описания электромагнитного поля, связанного с ВЧ катушками индуктивности, не существует простых теоретически обоснованных аппроксимирующих формул для расчета эффекта близости в произвольно построенной катушке на радиочастотах. Можно применять моделирование в электромагнитных си-

муляторах, использующих метод конечных элементов - COMSOL Multiphysics, FEMM, ANSYS и т.п. Для упрощения расчетов применяются псевдоаналитические методы расчета с применением таблиц, составленных на основе экспериментальных измерений.

В [51] приводится таблица рис.3.9 зависимости отношения длины катушки к ее диаметру (l/D) и шага намотки к диаметру провода (p/d).

$p/d \rightarrow$										
$l/D \downarrow$	1	1.111	1.25	1.429	1.667	2	2.5	3.333	5	10
0	5.31	3.73	2.74	2.12	1.74	1.44	1.20	1.16	1.07	1.02
0.2	5.45	3.84	2.83	2.20	1.77	1.48	1.29	1.19	1.08	1.02
0.4	5.65	3.99	2.97	2.28	1.83	1.54	1.33	1.21	1.08	1.03
0.6	5.80	4.11	3.10	2.38	1.89	1.60	1.38	1.22	1.10	1.03
0.8	5.80	4.17	3.20	2.44	1.92	1.64	1.42	1.23	1.10	1.03
1	5.55	4.10	3.17	2.47	1.94	1.67	1.45	1.24	1.10	1.03
2	4.10	3.36	2.74	2.32	1.98	1.74	1.50	1.28	1.13	1.04
4	3.54	3.05	2.60	2.27	2.01	1.78	1.54	1.32	1.15	1.04
6	3.31	2.92	2.60	2.29	2.03	1.80	1.56	1.34	1.16	1.04
8	3.20	2.90	2.62	2.34	2.08	1.81	1.57	1.34	1.165	1.04
10	3.23	2.93	2.65	2.27	2.10	1.83	1.58	1.35	1.17	1.04
∞	3.41	3.11	2.815	2.51	2.22	1.93	1.65	1.395	1.19	1.05

Рис. 3.9: Экспериментальная зависимость коэффициента.

Отношение длины исследуемых катушек к диаметру (l/D) можно принять равным нулю, а шаг намотки к диаметру провода (p/d) = 1.5. Коэффициент эффекта «близости» получается равным 2.12. Таким образом реальное значение сопротивления катушек становится 50 мОм.

Для оценки механического взаимодействия между двумя встречно включенными катушками был собран измерительный стенд, показанный на рис.3.10.

Суть эксперимента заключается в измерении вылета силовой катушке – H_{max} под действием силы ампера. Зная время воздействия силы и массы силовой катушки можно определить действующую на нее силу. Сила трения в данном эксперименте не учитываются. Магнитное поле считается однородным.

Эксперименты проводились с использованием магнитопроводящей плиты (1) в виде набора пластин электротехнического железа, ферритового сердечника, стальной плиты, и без нее. Результаты приведены в табл.(3.1).

Для подтверждения приведенных выше расчетов будет использован численный расчет движения силовой катушки на основе осциллограммы тока из

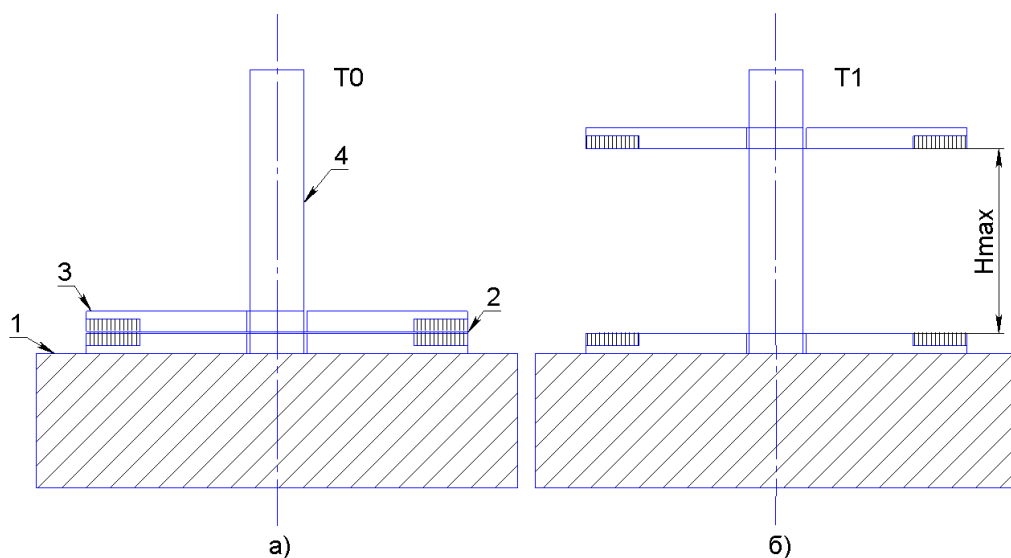


Рис. 3.10: Испытательный стенд. 1 – магнитопровод; 2- катушка намагничивания; 3- силовая катушка; 4 – направляющая.

Материал магнитопроводящей плиты	$H_{max}, \text{мм}$
без магнитопроводящей плиты	44
электротехническое железо	55
феррит	55
стальная плита	57

Таблица 3.1:

рис.3.8.

Параметр	Значение
Масса катушки	92 гр
Высота вылета	44 мм
Длина проводов	1.6 м
Число витков	7
Средний радиус витков	35 мм
Расстояние между катушками	1 мм

Таблица 3.2: Исходные данные для моделирования

Расстояние, которое пролетает силовая катушка под действием силы ампера менее 0.5 мм, исходя из экспериментальных данных исследования суммарной индуктивности, отображенных на рис.3.5, изменением параметров катушек можно пренебречь.

Зная зависимость тока от времени и геометрические размеры катушек по формуле (3.4) можно рассчитать значение вектора магнитной индукции, пронизывающий силовую катушку, от времени. Зависимость изображена в виде графика на рис.3.11.

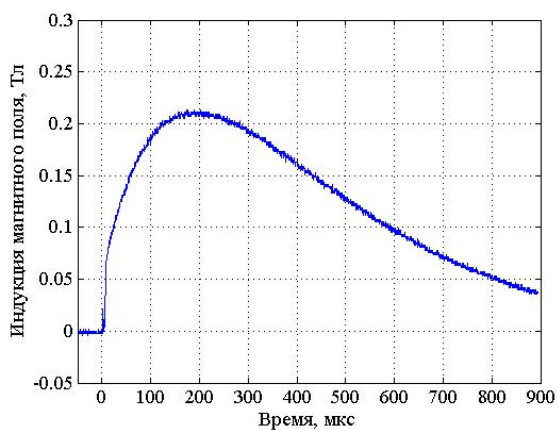


Рис. 3.11: Зависимость индукции магнитного поля

Сила, действующая на катушку рассчитывается по формуле (3.1):

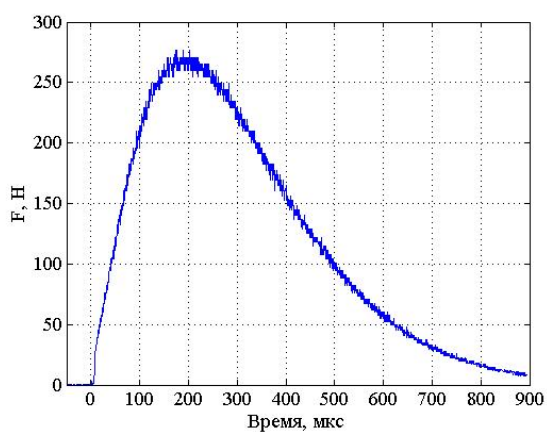


Рис. 3.12: Зависимость силы Ампера

Скорость до которой разгоняется катушка:

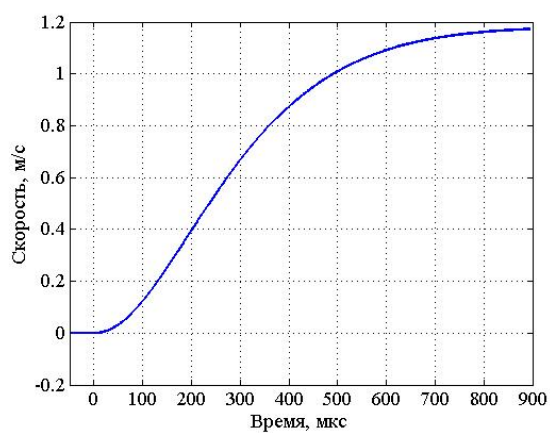


Рис. 3.13: Скорость силовой катушки

Уравнение, описывающее вертикальное перемещение тела под действием силы тяжести с ненулевой начальной скоростью:

$$S = V_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad (3.13)$$

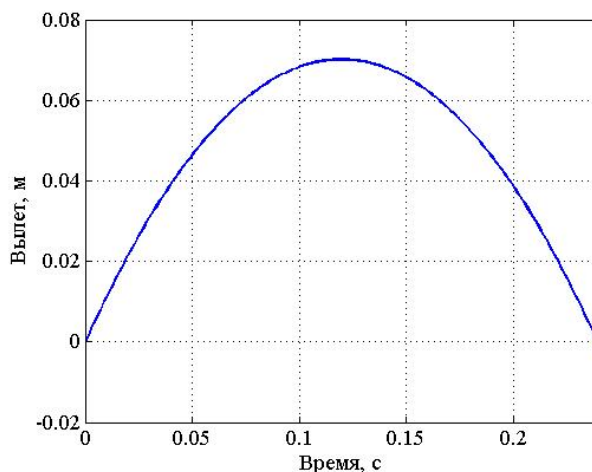


Рис. 3.14: Перемещение силовой катушки

Недостатком экспериментальной установки можно отнести низкую добротность системы, в следствии чего формируется плавный спад тока, а энергия механического воздействия растягивается во времени. Для более корректного импульса необходимо увеличить индуктивность катушки и уменьшить значение омических потерь. Снизить потери в проводниках возможно использованием провода большего сечения. Расхождение результатов моделирования с реальными экспериментами объясняется лабораторными условиями изготовления стенда, а также отсутствие в модели таких параметров как сила трения и вес подводящих проводников. Слабое влияние магнитопроводящей плиты на результаты эксперимента, приведенные в таблице (3.1) можно объяснить силой притяжения, возникающей между магнитопроводящей плитой и силовой катушкой, оказавшейся в роли электромагнита. Данная сила зависит обратно-пропорционально расстоянию и в данной работе не рассматривалась.

Электромагнитные двигатели (ЭМ) для излучения сейсмических волн получили наибольшее распространение. На основе ЭМ были созданы семейства излучателей, позволяющих получать силу удара до 100 тс, а их серийный выпуск налажен на предприятии ЗАО "Енисейгеофизика" в г. Минусинске. [56,59,58]

Магнитное поле (рис.3.17), создаваемое электромагнитом, прямо пропорционально количеству витков в обмотке N , и силе тока I , произведение NI на-



Рис. 3.15: СЭМ-100 производства ЗАО "Енисейгеофизика" г. Минусинск



Рис. 3.16: КЭМ-4 производства ЗАО "Енисейгеофизика" г. Минусинск

зывается силой намагничивания.

$$NI = B\left(\frac{L}{\mu} + \frac{G}{\mu_0}\right) \quad (3.14)$$

где B - магнитная индукция; L - длина силовых линий, м; G - величина зазора, м; μ - относительная магнитная проницаемость, Гн/м.

Сила, возникающая между якорем и индуктором, при прохождении тока через катушку индуктора, определяется по формуле Максвелла:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (3.15)$$

$$F = \frac{N^2 I^2 S}{2\mu_0 \left(\frac{L}{\mu} + \frac{G}{\mu_0}\right)^2} \quad (3.16)$$

Чаще всего магнитное сопротивление зазора много больше сопротивления ФС, $\left(\frac{L}{\mu} \ll \frac{G}{\mu_0}\right)$, таким образом:

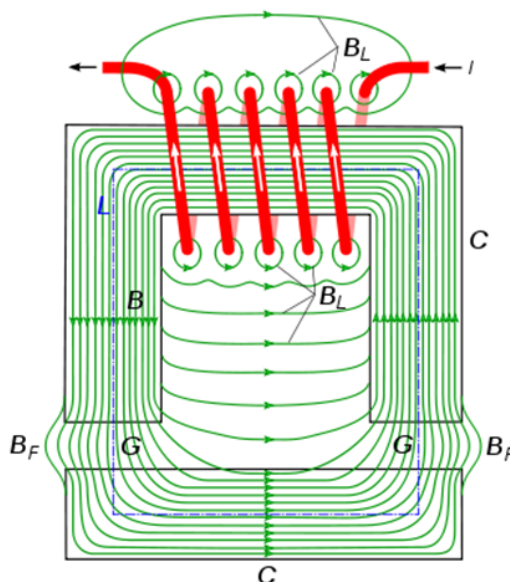


Рис. 3.17: Силовые линии в электромагните

Сила воздействия, не менее	15 кН
Длительность воздействия	3-5 мс
Интервал между последующими воздействиями	5 с
Сечение магнитопровода	0.016 м ²
Начальный зазор	0.008 м
Рабочее напряжение	850 В
Количество витков	48
Масса излучателя	148 кг

Таблица 3.3: Характеристики сейсмоисточника "Енисей ЭМ-1.6"

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 S}{2G^2} \quad (3.17)$$

3.1.2 Расчет экспериментального излучателя сейсмических волн

Для проведения экспериментальных исследований подтверждающих приведенные в Главе 2 теоретические данные, был использован модифицированный электропривод сейсмоисточника "Енисей ЭМ-1.6" производства ООО "Енисей-геофизика" г. Минусинска, самый маломощный в линейки выпускаемой продукции.

Данных приведенных в таблице 3.3 и формул из предыдущего параграфа практически достаточно, для создания математической модели, достоверно описывающей физические процессы, протекающие внутри электромагнита при прохождении тока через индуктор.

Сопротивление катушки электромагнита имеет индуктивный характер, чис-

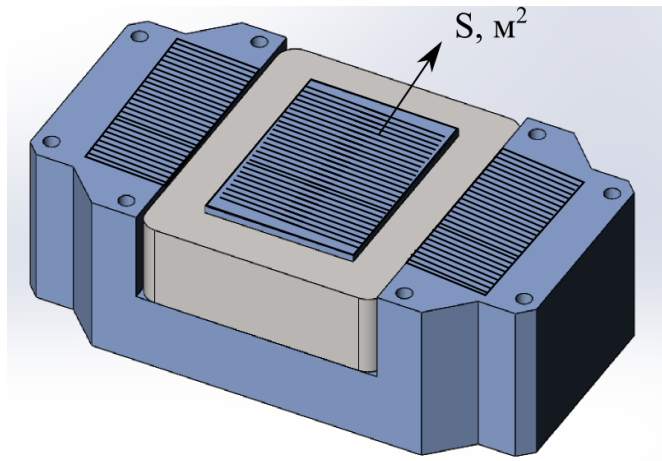


Рис. 3.18: Расчет индуктивности Ш-образного электромагнита

ленное значение которой находится из формулы: [72]

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{\Delta} \quad (3.18)$$

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 48^2 \cdot 0.016\text{м}^2}{0.008\text{м}} \approx 5.8\text{мГн}$$

Значение индуктивности требуется для расчета тока протекающего в колебательной RLC -цепи, при замыкании ключа, причем как видно из (3.18), значение индуктивности зависит от зазора между якорем и индуктором, который уменьшается под действием магнитных сил, в тоже время ток, протекающий через индуктор, зависит от мгновенного напряжения на емкости и значения индуктивности. Таким образом, процесс является взаимосвязанным, и наиболее просто решается при помощи численных методов.

Ключевым недостатком сейсмоисточника "Енисей ЭМ-1.6" и является его работа в режиме одиночных ударов, в момент удара индуктора об якорь излучаются помехи в широком диапазоне частот, но главное, что в режиме один удар в 5-6 секунд, плотность энергии сигнала крайне низкая.

Для предотвращения механического удара и реализации режима серийных импульсов, в конструкцию электромагнита были внедрены амортизирующие демпферы, выполняющие роль пружин. Основными требованиями, предъявляемые к материалу амортизаторов являлись механическая прочность, высокая добротность колебательных процессов и упругость. Так как усилие электромагнита имеет обратно квадратичную зависимость (3.17) от зазора, то деформация пружины должна быть минимальной. В опытном образце в качестве демпфера использовались листы полиуретана, имеющие 65 единиц твердости по Шору

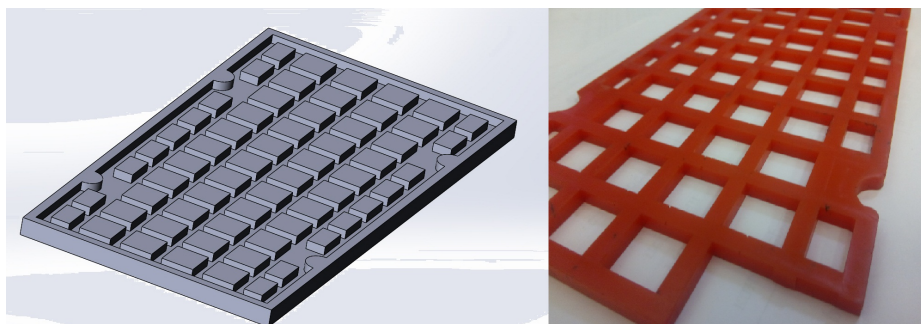


Рис. 3.19: Модель литейной формы и готовый полиуретановый амортизатор

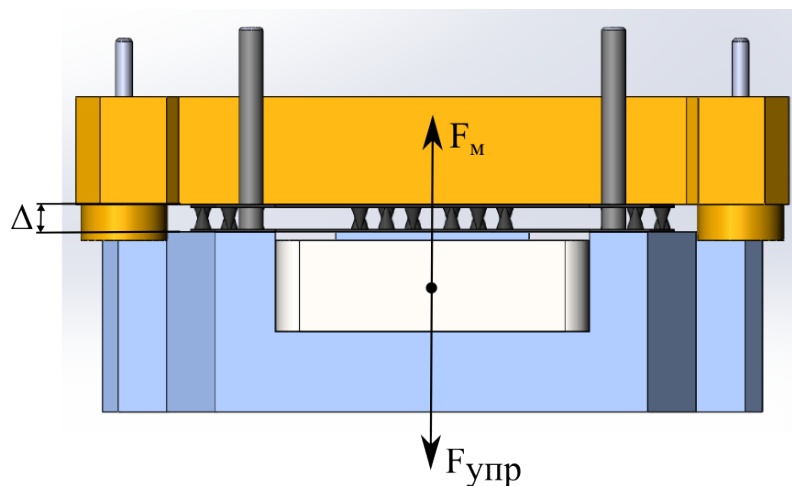


Рис. 3.20: Схема электромагнита с амортизирующими пластинами

[69].

На рисунке 3.20, приведено схематичное изображение поясняющее работу электромагнитного магнита, для создания периодических колебаний. Полиуретановые пластины расположены с двух сторон от индуктора: между индуктором и излучающей плитой, а также между индуктором и якорем.

Ширина пластин выбрана равной 6 мм, исходя из оптимального магнитного зазора, с точки зрения максимального усилия. Опытным путем была подобрана жесткость тела, обеспечивающая под действием усилия в 1000 Н деформацию не менее 1 мм. Из справочных данных известно, что для сохранения механических свойств материала, линейные растяжения полиуретана не должны превышать 150%. Под действием силы тяжести инертной массы, пластины сдавлены на 2 мм каждая, а во время действия магнитных сил зазор между якорем и индуктором сокращается до 4 мм. Когда ток, проходящий, через индуктор ослабевает, и сила упругости вместе с силой тяжести преобладает, и индуктор, вместе с присоединенной инертной массой начинает двигаться вниз, сжимая нижнюю пластину. Таким образом получается вынужденное колебательное движение инертной массы.

3.2 Источник питания. Зарядное устройство и преобразователь напряжения.

Специфика процесса заряда емкостных накопительных систем заключается в том, что зарядное устройство включено на активную нагрузку с низким внутренним сопротивлением. Незначительное внутреннее сопротивление требует от устройств заряда одного — по своим внешним характеристикам оно не только должно быть стабилизатором тока как замкнутая система регулирования, но и обладать свойствами естественного ограничения тока по его мгновенным значениям, поэтому из рассмотрения можно исключить все схемы, являющиеся источниками напряжения по выходу [60].

При разработке мощных преобразователей напряжения, более 1 кВт, с выходным напряжением превышающим 60 В, необходимо выполнить гальваническую развязку между входными и выходными электрическими цепями, для обеспечения необходимого уровня защиты человека при прямых или косвенных контактах с оборудованием [61]. В данном случае рационально использовать DC-DC преобразователи с импульсными трансформаторами. Примеры использования таких топологий:

- обратноходовые импульсные преобразователи;
- прямоходовые импульсные преобразователи;
- преобразователь с друхтактным выходом;
- преобразователь с полумостовым выходом;
- преобразователь с мостовым выходом.

В работах [62-64] описаны наиболее известные схемы источников для заряда емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Однако предложенные пути повышения коэффициента полезного действия ведут к увеличению количества элементов схемы и, как следствие, изменению массогабаритных параметров [65].

В данной работе рассмотрим пример расчета обратноходового преобразователя напряжения, а также ряд методов по сокращению времени заряда силовых конденсаторов и повышения КПД преобразователя. Приведенные расчеты были использованы и доказали свою эффективность при разработке зарядного устройства для конденсаторов ПР48/850, в рамках работ по повышению эффективности сейсморазведки в Восточной Сибири (Постановление Правительства РФ от 09.04.2010 № 218) [66].

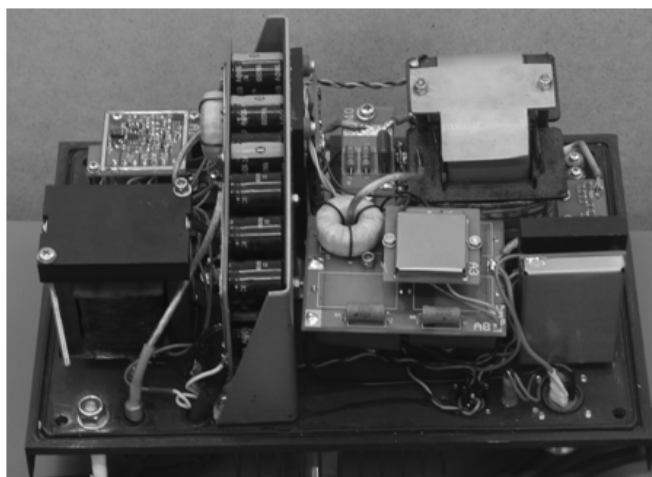


Рис. 3.21: Зарядное устройство ЕНЭ.

3.2.1 Обоснование выбора схемы заряда силового конденсатора.

При выборе схемы построения источника во главу угла ставится задача создания надежного и простого преобразователя для зарядки высоковольтной накопительной емкости. Сетевые источники, питающие нагрузки небольшой мощности (до 100-150 Вт), встраиваемые в достаточно габаритную аппаратуру, лучше строить по однотактной fly-back схеме. Для стабилизаторов, в которых не требуется гальванической развязки нагрузки от питающей сети, применяют чопперную схему. При питании от гальванических элементов или аккумуляторов можно использовать бустерную схему. Однако не исключены ситуации, в которых перечисленные преобразователи и стабилизаторы использовать нельзя [10]. В первой ситуации – прибор, питаемый от сети переменного тока, имеет ограниченные габариты (к примеру, в приборном корпусе не удастся разместить достаточно крупный накопительный трансформатор fly-back конвертора. Вторая ситуация – отдельные части схемы прибора требуют дополнительного питания, гальванически развязанного от остальной схемы.

Во всех этих случаях требуется разработка так называемых двухтактных схем преобразователей, имеющих гальваническую развязку первичной и вторичной цепей. Наибольшее распространение среди двухтактных конверторов получили три схемы: двухфазная пуш-пульная (push-pull), полу-мостовая (half-bridge) и мостовая (full-bridge). Достоинство этих схем состоит в том, что при необходимости разработчик может легко ввести в конструкцию узел стабилизации выходного напряжения, либо отказаться от него. В первом случае конвертор будет представлять собой полноценный источник питания, к которому можно подключать любую нагрузку. Во втором случае получится простой преобразователь электрической энергии, требующий дополнительной стабилиза-

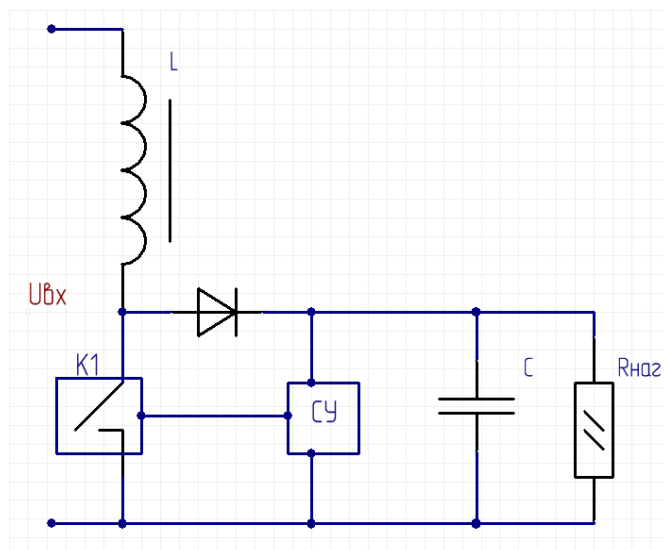


Рис. 3.22: Базовая схема бустерного преобразователя.

ции по выходу.

Бустерная схема.

Чтобы получить выходное напряжение, превышающее величину входного можно использовать бустерную схему, которая изображена на (рис. 3.22).

Ключевой элемент Кл, в качестве которого используется IGBT - транзистор, подключен параллельно нагрузке R_H и работает в импульсном режиме, то есть попеременно замыкается и размыкается с частотой преобразования. Диод VD блокирует нагрузку и конденсатор фильтра C от ключевого элемента в нужные моменты времени.

Когда ключ замкнут, ток i_z от источника питания $U_{П}$ протекает через дроссель L , запасая в нем энергию. Диод VD при этом отсекает (блокирует) нагрузку и не позволяет конденсатору фильтра разряжаться через замкнутый ключ. Ток в нагрузку в этот промежуток времени поступает только от конденсатора C . Далее, когда ключ закрывается, ЭДС самоиндукции дросселя суммируется с выходным напряжением и энергия тока дросселя отдается в нагрузку. При этом выходное напряжение U_H оказывается больше входного $U_{П}$.

Следует обратить внимание на то, что, в отличие от чопперной схемы, дроссель L не является элементом фильтра, а выходное напряжение становится больше входного на величину, определяемую индуктивностью дросселя L и скважностью работы ключа. Рабочий цикл бустерной схемы также состоит из двух фаз: фазы заряда дросселя и фазы его разряда на нагрузку.

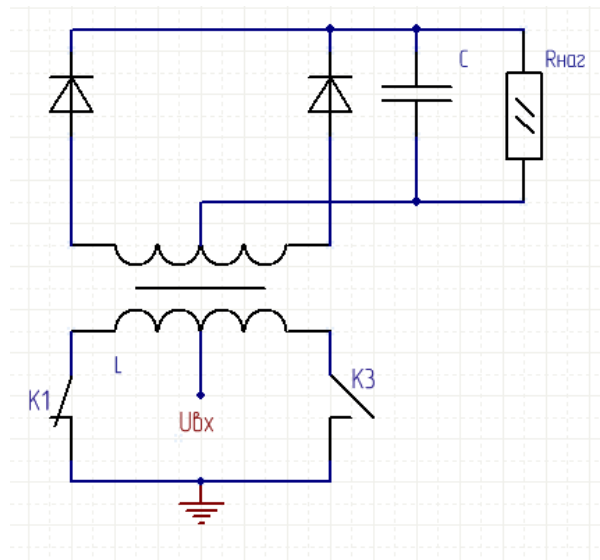


Рис. 3.23: Базовая двухтактная push-pull схема преобразователя.

Пуш-пульная двухфазная схема.

Схема (рис. 3.23) состоит из двух ключевых элементов Кл1 и Кл2, в качестве которых используются мощные MOSFET или IGBT транзисторы. Трансформатор Тр имеет первичную и вторичную обмотки, разделенные на полуобмотки. К средней точке первичной обмотки подключен вывод источника питания. Вторичная цепь представляет собой двухфазный двухполупериодный выпрямитель $VD1, VD2$, а также фильтр пульсаций (в этой схеме элементом фильтра является конденсатор C_{ϕ}).

В первом такте, как показано на рис.3.24, Кл1 замкнут, Кл2 разомкнут, ток течет по полуобмотке 1.1 и трансформируется в полуобмотку 2.1. Диод $VD1$ открыт и проводит ток $i_{2,1}$, подзаряжая конденсатор C_{ϕ} . Во втором такте, изображенном на рис.3.25, ключ Кл1 открывается и закрывается ключ Кл2. Соответственно ток $i_{1,2}$ течет по полуобмотке 1.2 и трансформируется в полуобмотку 2.2. Диод $VD1$ заперт, диод $VD2$ проводит ток $i_{2,2}$ подзаряжая конденсатор C_{ϕ} . Таким образом, передача энергии в нагрузку осуществляется во время обоих тактов.

Полумостовая схема.

Полумостовая схема показана на рис. 3.26. Для накопления энергии в полумостовой схеме используются два конденсатора одинаковой емкости. На выходной трансформатор полумостовой схемы задается напряжение переменной полярности, изменяющейся каждый полупериод. Поэтому здесь не возникают проблемы симметрирования, столь существенной для двухтактных схем. Тран-

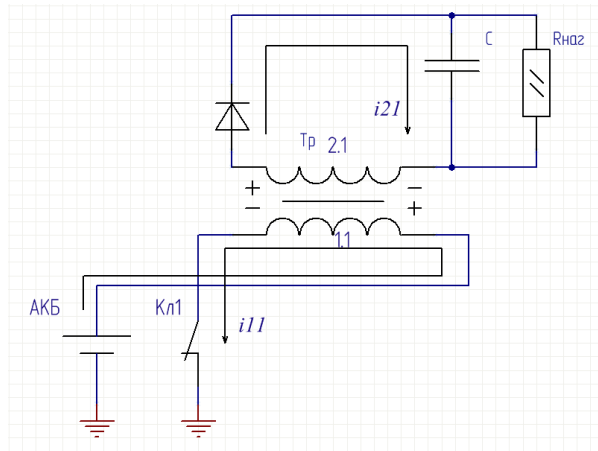


Рис. 3.24: Первый рабочий такт push-pull схемы.

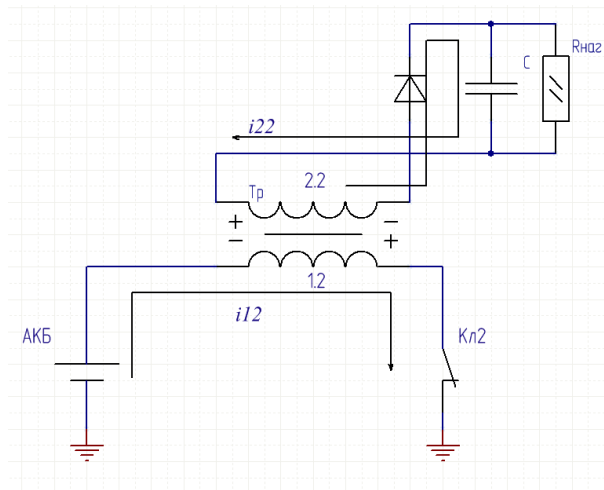


Рис. 3.25: Второй рабочий такт push-pull схемы.

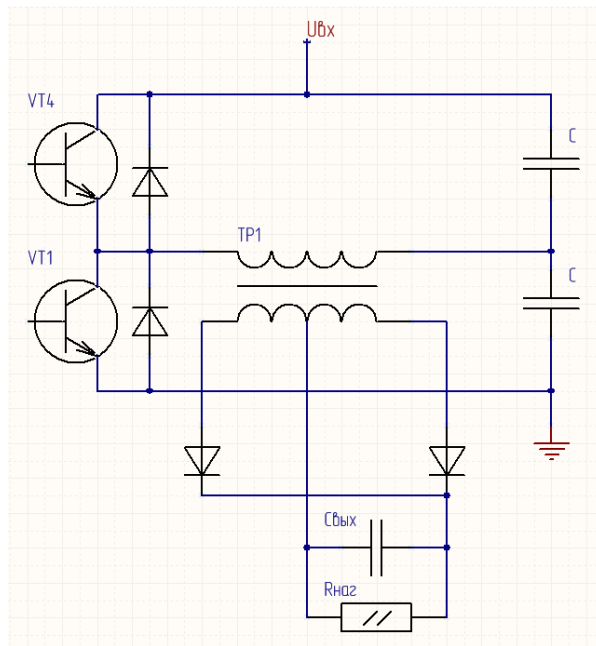


Рис. 3.26: Полумостовая схема.

зисторы T1 и T2 попеременно подсоединяют первичную обмотку Tr к земле и $U_{вх}$. Напряжение на трансформаторе равно $0.5U_{вх}$, когда T1 включен, и $U_{вх} - 0.5U_{вх} = 0.5U_{вх}$, когда T2 включен, так как каждый конденсатор заряжается до $0.5U_{вх}$. Мощность, снимаемая с полумостовой схемы, составляет $0.5U_{вх} \cdot I_k$. Поэтому при заданном значении $U_{вх}$ для получения большей мощности ток I_k должен быть большим. Падение напряжения на транзисторах T1 и T2 в запертом состоянии составляет только $U_{вх}$.

Необходим некоторый промежуток времени - мертвое время - между выключением одного транзистора и включением другого, в противном случае ток, протекающий через отключаемый транзистор (сквозной ток), в течение времени задержки выключения ничем не будет ограничен, что приведет к выходу из строя силовых транзисторных ключей.

Диоды VD1 обеспечивают ограничение напряжения, индуцируемого в первичной обмотке Tr1, когда и T1, и T2 отключаются (как это имеет место в период мертвого времени или выше при ШИМ). Исчезающее магнитное поле может вызвать появление на первичной обмотке в этом случае либо на уровне $U_{вх}$, либо на уровне потенциала земли. Эти диоды называются защитными диодами.

Мостовая схема.

Мостовая схема, показанная на рис. 3.27, может отдавать такую же мощность, как и полумостовая, но при половинном значении тока коллектора, или

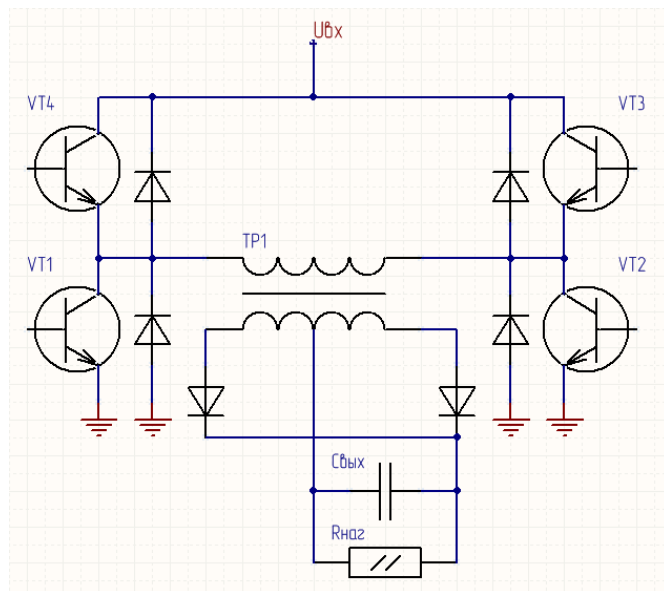


Рис. 3.27: Мостовая схема.

такую же, как двухтактная, но при половинном значении напряжения для каждого транзистора. Транзисторы включаются парами. Так, транзисторы Т1 и Т3 обеспечивают один полупериод выхода и Т2, Т3 - другой. Если используется ШИМ, то необходимо предусмотреть мертвое время по той же причине, что и для полумостового. Мостовой преобразователь требует на два транзистора больше, чем полумостовой или двухтактный и сложнее в управлении. Тем не менее мостовая схема преобразователя вобрала в себя все лучшее, что было у двухтактной и полумостовой схем преобразователей:

- только одна первичная обмотка трансформатора (как в полумостовой схеме);
- напряжение на запертом ключе не превосходит $U_{вх}$ и не требуется подключения демпфирующих цепей для устранения выбросов напряжения на запираемом транзисторе (как в двухтактной схеме) [67].

Схема мостового резонансного преобразователя.

Основу резонансного преобразователя (РП) составляет резонансный контур, к которому поступает симметричное прямоугольное импульсное напряжение или ток, формируемый ключами. Импульсное напряжение содержит спектр нечетных гармоник, начиная с первой. Элементы резонансного фильтра L и C настраиваются в резонанс с первой гармоникой (для определенного режима работы преобразователя). Образованный LC - резонансный фильтр отфильтровывает высшие гармоники напряжения или тока и делает это тем лучше, чем выше добротность контура.

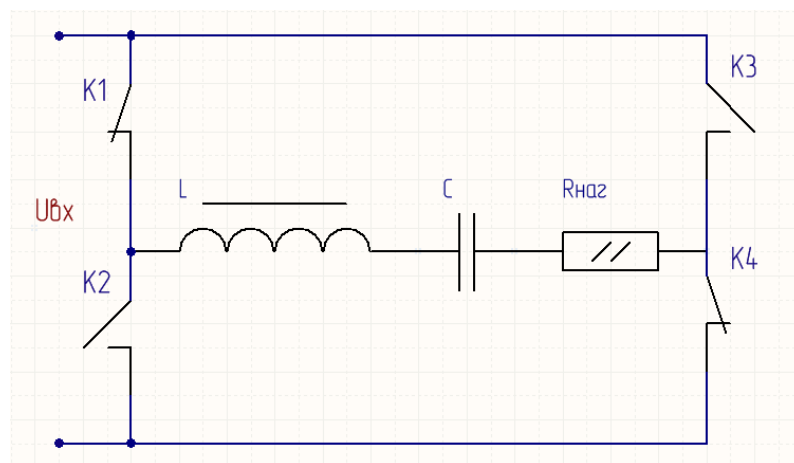


Рис. 3.28: Мостовой последовательный РП.

Еще одна особенность РП связана с процессами переключения транзисторов выходного каскада. Из-за того, что либо ток, либо напряжение на ключе за время переключения близки к нулевому значению, устраняются потери на выключение. Поэтому РП могут работать на значительно более высоких частотах.

Среди многих видов резонансных преобразователей с мощностью выше 500 Вт наиболее приемлемыми являются мостовые резонансные преобразователи с последовательным подключением нагрузки к резонансному контуру.

Мостовой преобразователь с последовательным резонансным контуром, работающий от источника постоянного напряжения $U_{вх}$, представлен на рис. 3.28

В данной схеме в каждой половине периода замкнуты диагонально расположенные ключи моста: ключи Кл1, Кл4 замкнуты в один полупериод, ключи Кл2, Кл3 - в другой; происходит переключение плеч моста с выбранной (обычно управляемой) частотой коммутации.

При выборе частоты коммутации ключей F_k по отношению к резонансной частоте силового контура F_0 необходимо учитывать следующее: при $F_k < F_0$ в ключе присутствуют потери при включении и нет потерь на выключение. При $F_k > F_0$ в ключе отсутствуют потери на включение. [68] При использовании полевых транзисторов более весомыми являются потери на их включении, чем на выключение. Следует сказать также, что в реальных схемах для предотвращения сквозного тока через транзисторы необходимо сформировать короткую паузу после выключения одной диагональной пары и до включения другой. Данная особенность управления относится как к полумостовой схеме, так и к двухтактной. Сопротивление R_H , являясь нагрузкой преобразователя, производит отбор энергии из контура. В преобразователях, где требуется обеспечить гальваническую развязку цепей нагрузки и моста, используют высокочастотный силовой трансформатор (как правило сердечник из феррита). В этом слу-

чае в силовой контур (в точки А и В) последовательно включается первичная обмотка трансформатора, а к вторичной обмотке подключается нагрузка. При этом появляется возможность установить на нагрузке требуемую величину напряжения за счет выбора коэффициента трансформации. Из-за возможности работы на более высоких частотах выходной фильтр выпрямителя получается более компактным. Для данной схемы выходной фильтр начинается с емкости.

Гальваническая развязка обеспечивается изоляцией между обмотками трансформатора.

Сравнительные характеристики методов высокочастотного преобразования.

У каждой схемы были выявлены свои преимущества (П) и свои недостатки (Н):

Бустерная схема:

П: возможность получения выходного напряжения больше чем входного, с высоким КПД

Пуш-пульная схема:

П: два силовых транзистора, высокий КПД, простая схема управления.

Н: повышение напряжения на запертом транзисторе.

Полумостовая схема:

П: два силовых транзистора, пониженное напряжение на запертом транзисторе.

Н: повышение напряжения на запертом транзисторе.

Мостовая схема:

П: пониженное напряжение на запертом транзисторе, хорошее использование транзисторов по току, прямоугольная форма напряжения.

Н: сквозной ток, четыре силовых транзистора, усложненная форма управления.

Схема мостового резонансного преобразователя:

П: пониженное напряжение на запертом транзисторе, хорошее использование транзисторов по току, гальваническая развязка, режим генератора тока, равномерное потребление энергии от источника, высокий КПД.

Н: сквозной ток, четыре силовых транзистора, усложненная форма управления, повышенные требования к элементам силового резонансного контура.

Проанализировав представленные схемы, за основу были взяты два альтернативных варианта:

1. бустерная схема;

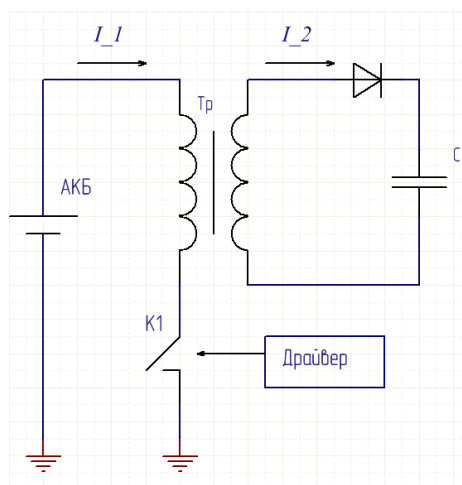


Рис. 3.29: Упрощенная схема обратноходового импульсного преобразователя.

2. схема мостового резонансного преобразователя.

3.2.2 Принцип работы и определение временных закономерностей обратноходового преобразователя.

Первому такту работы преобразователя, показанному на (рис.3.29), свойственно снятие напряжения с источника питания. Ключ заперт, вследствие чего ток проходит через первичную обмотку трансформатора и накапливается в виде магнитного поля. Диод в этом случае не пропускает ток во вторичной цепи трансформатора. При втором такте работы ключ открыт, а напряжение самоиндукции поляризует диод в направлении проводимости. Фазировка обмоток трансформатора происходит тогда, когда во время прямого хода при открытом ключе тока во вторичной цепи нет. Это вызывает накопление энергии в сердечнике трансформатора в виде разворачивающегося магнитного поля. Когда наступает обратный ход при запираии ключа магнитное поле сердечника вызывает ЭДС. во вторичной цепи трансформатора, которая заряжает конденсатор через диод VD .

Когда сигнал управления с драйвера открывает ключ Кл и в первичной обмотке трансформатора Тр протекает ток I_1 :

$$I_1 = \frac{U_{\text{АКБ}} \cdot t}{L_1} \quad (3.19)$$

где L_1 - индуктивность первичной обмотки трансформатора; $U_{\text{АКБ}}$ - напряжение на аккумуляторной батарее; t - время.

При достижении I_1 величины I_{1M} , соответствующей насыщению сердечника трансформатора T_p драйвер закрывает ключ, при этом во вторичной обмот-

ке трансформатора наводится ток I_2 , заряжающий силовой конденсатор C до напряжения U_C , при этом:

$$U_C = I_{1M} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot L_1}{C}} \quad (3.20)$$

Здесь N - число тактов преобразования.

Откуда необходимое число тактов преобразования N определяется:

$$N = \frac{C}{L_1} \cdot \frac{U_C^2}{I_{1M}^2} \quad (3.21)$$

Период одного преобразования t_N определяется суммой времени накопления энергии в первичной обмотке трансформатора t_1 :

$$t_1 = \frac{I_{1M} \cdot L_1}{U_{\text{АКБ}}} \quad (3.22)$$

и времени передачи энергии в силовой конденсатор, которое, в свою очередь зависит напряжения на этом конденсаторе.

$$t_2 \approx \frac{I_{2M} \cdot L_2}{U_C} = \frac{I_{1M} \cdot L_1 \cdot K}{U_C} \quad (3.23)$$

При энергии, запасенной в силовом конденсаторе $E_c \geq E_{L_1}$ - энергии запасенной в первичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации K определяется отношением числа витков во вторичной обмотке трансформатора к числу в первичной.

Для первого такта преобразования время заряда силового конденсатора T_2 определяется четвертью периода резонансной частоты цепи C, L_2 , т.е

$$t_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{L_2 \cdot C} \quad (3.24)$$

Полное время заряда T силового конденсатора, до напряжения силового конденсатора U_C определяется выражением:

$$T = \frac{I_{1M} \cdot L_1}{U_{\text{АКБ}}} \cdot N + \sum_1^N t_2(n) \quad (3.25)$$

Второе слагаемое (3.25) представляет полную сумму времени заряда силового конденсатора T_2 за N периодов преобразования, причём, время n -ого периода t_{2n} определяется выражением:

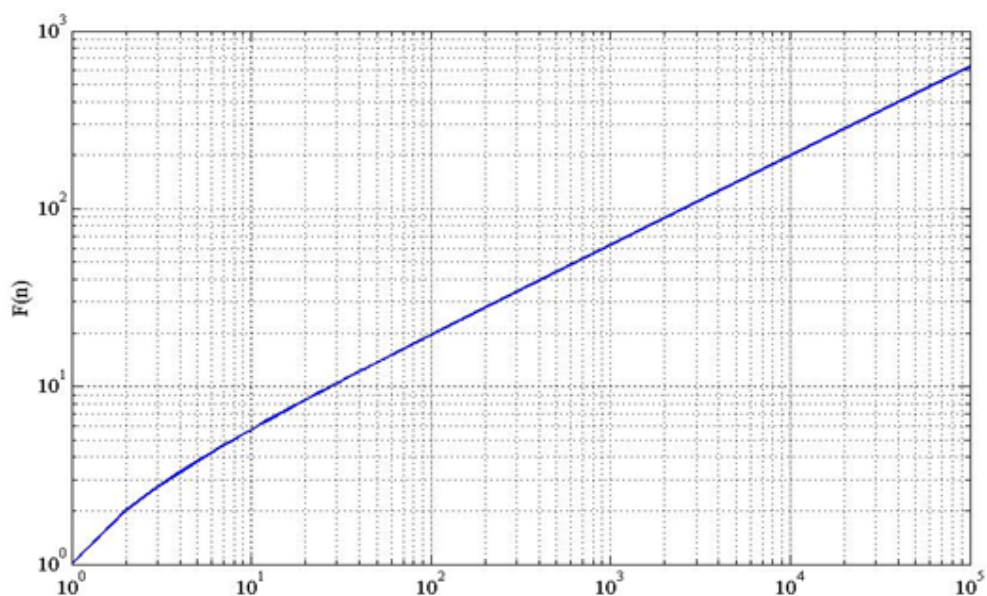


Рис. 3.30: График функции $f(N) = \sum_1^N \frac{1}{\sqrt{n}}$.

$$t_{2n} = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot C} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.26)$$

Таким образом, время T_2 равно:

$$T_2 = K \cdot \sqrt{L_1 \cdot C} \cdot \sum_1^N \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.27)$$

Выражение (3.27) представляет собой расходящийся ряд, и его сумма имеет смысл только для конкретного значения N . На рис.3.30 приведена зависимость суммы ряда от числа циклов накопления N .

Выражения (3.22), (3.25), (3.26), (3.27) полностью отражают временные стадии процесса преобразования напряжения и позволяют рассчитать основные параметры преобразователя.

3.2.3 Методы сокращения времени заряда емкостного накопителя энергии и повышения КПД преобразователя.

Увеличение тока первичной цепи трансформатора.

Сокращение времени заряда силового конденсатора увеличением тока первичной цепи трансформатора I_{1M} ограничено предельными параметрами ключа – это максимально допустимым током ключа и его предельным рабочим напряжением.

Требуемое значение I_{1M} для трансформаторного варианта преобразователя определяется выражением:

$$I_{1M} = \frac{C \cdot U_C}{T} \cdot \left(\frac{U_C}{U_{\text{АКБ}}} + 2K \right) \quad (3.28)$$

Ключ выбирается с предельно допустимым током не менее требуемого значения I_{1M} .

Увеличение напряжения аккумуляторной батареи.

Полное время заряда силового конденсатора T равно сумме полного времени накопления энергии в первичной обмотке трансформатора $T_1 = t_1 N$, представляющего первое слагаемое выражения (3.25) и полного времени заряда силового конденсатора T_2 , представляемое вторым слагаемым.

Увеличение напряжения аккумуляторной батареи $U_{\text{АКБ}}$ приводит к пропорциональному сокращению T_1 , согласно (3.27) T_2 не изменяется, при этом максимальный ток первичной обмотки трансформатора I_{1M} и число тактов преобразования N также остаются неизменными.

КПД преобразования при увеличении $U_{\text{АКБ}}$ существенно повышается за счёт уменьшения активных потерь на внутреннем сопротивлении ключей и первичной обмотки пропорционально уменьшению времени T_1 , что особенно важно для снижения тепловых потерь.

Сокращение времени заряда T_2 коэффициентом трансформации K .

Второе слагаемое суммарного времени заряда ЕНЭ (3.25), определяемое выражением (3.27), может уменьшаться только уменьшением коэффициента трансформации K .

Уменьшение K приводит к увеличению рабочих напряжений на ключе. Так, напряжение на ключе равно:

$$U_K = U_{\text{АКБ}} + \frac{U_C}{K} \quad (3.29)$$

КПД преобразования увеличивается вследствие уменьшения тепловых потерь на внутреннем сопротивлении диода.

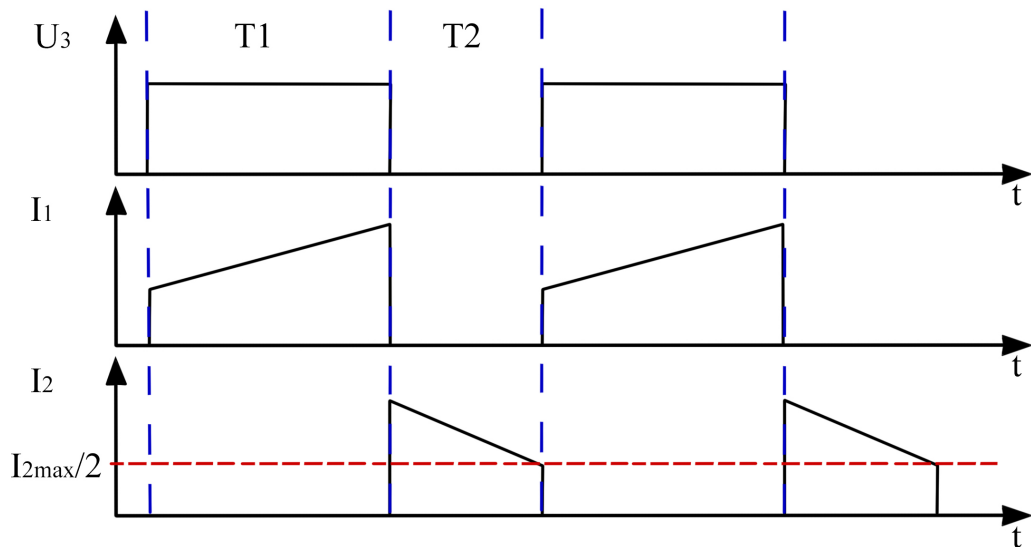


Рис. 3.31: Эпюры обратноходового преобразователя

Отсечка тока заряда ЕНЭ I_2 .

Энергия, снимаемая с вторичной обмотки трансформатора, пропорциональна квадрату тока в ней, т.е. $E_2 = \frac{I_2^2 \cdot L_2}{2}$. Поэтому, если прекратить заряд силового конденсатора на уровне $0.5 \cdot I_2 M$, как показано на рис.3.31, то на $\frac{1}{4}$ энергии E_2 ЕНЭ будет недозаряжен, но при этом период одного цикла преобразования сократится в 2 раза. Исходя из этого, полное время заряда силового конденсатора сократится на треть.

КПД преобразования при введении отсечки повысится за счёт уменьшения на треть тепловых потерь на ключе и диоде.

Регулируемый режим заряда ЕНЭ.

Предложенными приёмами общее время заряда силового конденсатора может быть сокращено в 5-6 раз. При этом, потребляемая мощность от первичного источника соответственно возрастает в 5-6 раз, что может превысить возможности источника. Однако, режим быстрой зарядки ЕНЭ привлекателен увеличением КПД преобразования за счёт уменьшения тепловых потерь. Поэтому целесообразно ввести устройство ограничения потребляемой мощности от высоковольтного источника питания.

Принцип ограничения потребляемой мощности основан на ограничении минимально допустимого периода цикла преобразования напряжения путём введения в драйвер преобразователя ждущего мультивибратора. Ждущий мультивибратор навязывает постоянный период цикла преобразования при превы-

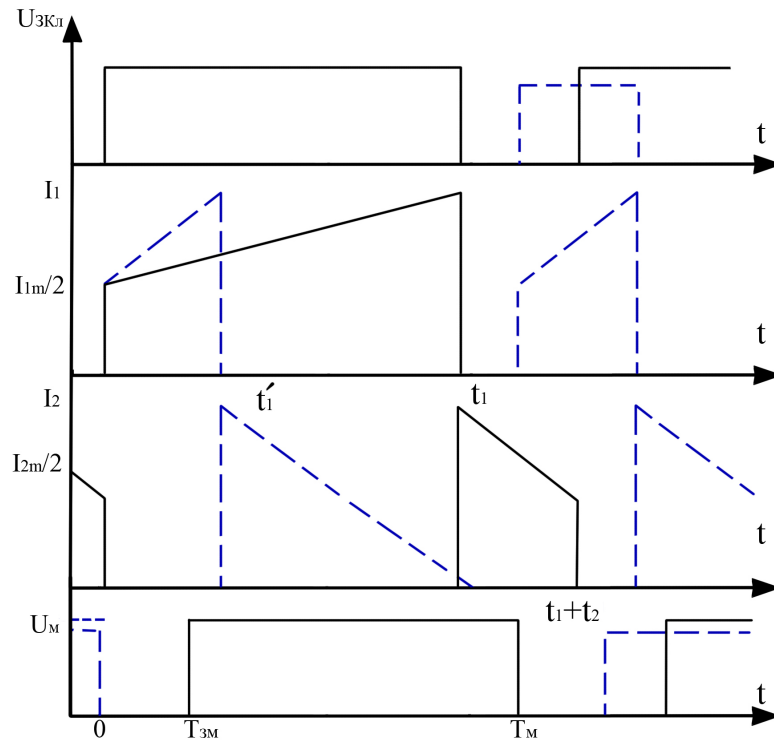


Рис. 3.32: Диаграмма работы преобразователя напряжения.

шении мощности потребления выше установленного уровня. При этом высший КПД, обусловленный высоким напряжением и низким K , сохраняется, а составляющая повышения КПД, обусловленная отсечкой тока во вторичной обмотке I_{2M} сохраняется только до наступления режима ограничения потребляемой мощности.

На рис. 3.32 приведена диаграмма работы преобразователя напряжения, поясняющая принцип ограничения потребляемой мощности. При низком напряжении питания период цикла преобразования напряжения определяется временем, соответствующему току во вторичной обмотке трансформатора, равному половине его максимального значения, т.е. моменту $t_1 + t_2$.

При повышении напряжения питания скорость нарастания тока в первичной обмотке трансформатора увеличивается, сокращая t_1 до значения t'_1 , при этом момент $t'_1 + t_2$ блокируется импульсом мультивибратора. Запуск следующего цикла преобразования осуществляется задним фронтом импульса мультивибратора T_m . Запускается мультивибратор передним фронтом импульса управления ключом Кл с задержкой на время T_d , необходимого для восстановления постоянной составляющей конденсатора мультивибратора.

3.2.4 Расчет основных параметров преобразователя напряжения

Максимальный ток первичной обмотки трансформатора I_{1M} определяется соотношением (3.28) при минимальном напряжении аккумуляторной батареи 42 В, напряжении $U_C = 250\text{В}$ на силовом конденсаторе емкостью $C = 4000\text{мкФ}$, коэффициенте трансформации $K = 4$ и времени заряда $t = 0.25\text{с}$:

$$I_{1M} = \frac{C \cdot U_C}{T} \cdot \left(\frac{U_C}{U_{\text{АКБ}}} + 2K \right) \quad (3.30)$$

$$I_{1M} = \frac{4000\text{мкФ} \cdot 250\text{В}}{0.25\text{с}} \cdot \left(\frac{250\text{В}}{42\text{В}} + 2 \cdot 4 \right) = 55.8\text{А}$$

Коэффициент трансформации $K = 4$ выбран из условия (3.29) для ключа с рабочим максимальным напряжением $U_K = 600\text{В}$ и максимального напряжения питания $U_{\text{АКБ}} = 250\text{В}$.

Задаваясь временем накопления энергии в первичной обмотке трансформатора T_p , равным 160 мкс по соотношению (3.19), определим требуемую индуктивность первичной обмотки трансформатора L_1 для минимального напряжения $U_{\text{АКБ}} = 42\text{В}$:

$$L_1 = \frac{U_{\text{АКБ}} \cdot t_1}{I_{1M}} \quad (3.31)$$

$$L_1 = \frac{42\text{В} \cdot 0.25\text{с}}{55.8\text{А}} = 120\text{мкГн}$$

Трансформатор Т1 изготовлен на сердечнике ГАММАМЕТ ГМ24ДС ПЛ 20 · 40 · 50 с индуктивностью первичной обмотки 90 мкГн, током насыщения 100 А и коэффициентом трансформации $K = 4$.

Плавный пуск по питанию обеспечивает ограничение пускового тока на уровне не более 3 А.

Порог уровня минимального напряжения на аккумуляторных батареях принят равным 60 В.

Порог защиты максимального напряжения на выходе преобразователя устанавливается на уровне 400 В.

3.3 Приемник

3.3.1 Входной усилитель

Приемник состоит из сейсмоприемника - геофона, усилителя, АЦП и персонального компьютера.

В ходе работ использовалось два разных усилителя, первый обладает относительно равномерной частотной характеристикой в диапазоне от 1 до 1000 Гц, в то время как второй - имеет избирательную направленность, с тремя переключаемыми диапазонами.

Широкополосный усилитель дает возможность оценить фоновую шумовую обстановку, выбрать оптимальный частотный диапазон для имеющейся среды распространения сейсмических волн. Дальнейшее выделение сигнала из шума происходит при помощи цифрового узкополосного фильтра.

Основная причина, мешающая использованию широкополосного усилителя, в реальных условиях - избыточные требования к диапазону измерения АЦП. Это вызвано тем, что амплитуда полезного сигнала, на выходе сейсмоприемника составляет единицы микровольт, в то время как амплитуда помех может достигать десятков, и даже сотен милливольт. При данных условиях дополнительные искажения в принимаемый сигнал может вносить нелинейность аналого-цифрового преобразователя.

В связи с тем, что наиболее сильные помехи имеют узкополосный спектр (сетевая помеха 50 Гц) или находятся в нижней полосе частот (до 70 Гц), было принято решение использовать активный фильтр.

Схема используемого фильтра сложнее в сравнении с фильтрами на источнике напряжения, управляемые напряжением (ИНУН), но она широко применяется благодаря повышенной устойчивости и легкости регулировки. Называется фильтром на основе метода переменных состояния. Среди достоинств этой схемы существенна возможность путем коммутации входов получать из одной схемы фильтр верхних и нижних частот, а так же полосовой фильтр. Кроме того частоту фильтра можно регулировать при неизменном значении добротности Q (или не изменной полосе пропускания - по выбору) характеристике в полосе пропускания. Как и при работе с другими активными фильтрами, несколько секций могут быть соединены каскадно, для создания фильтров более высоких порядков.

Несмотря на большое количество схемных элементов, фильтр, построенный на основе метода переменных состояния, представляется наиболее удачной схе-

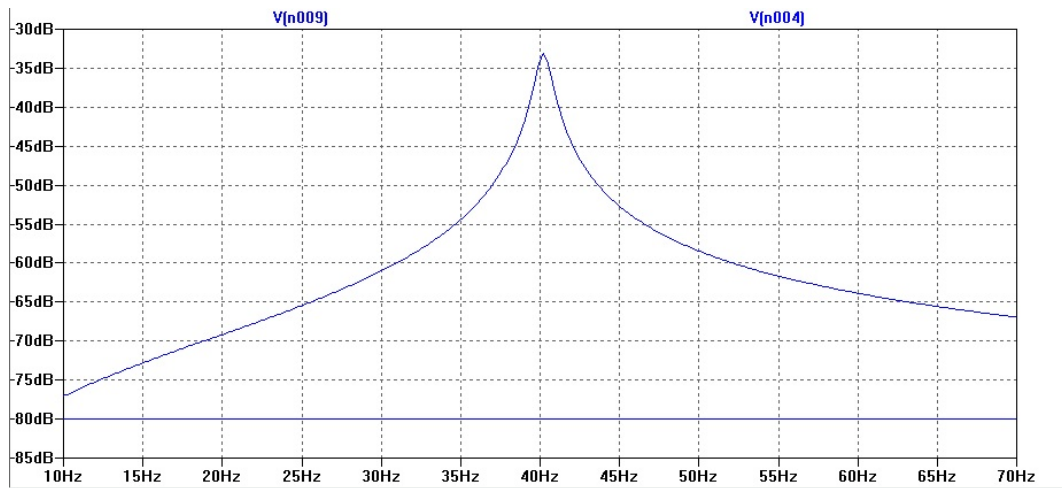


Рис. 3.33: "Низкий" диапазон.

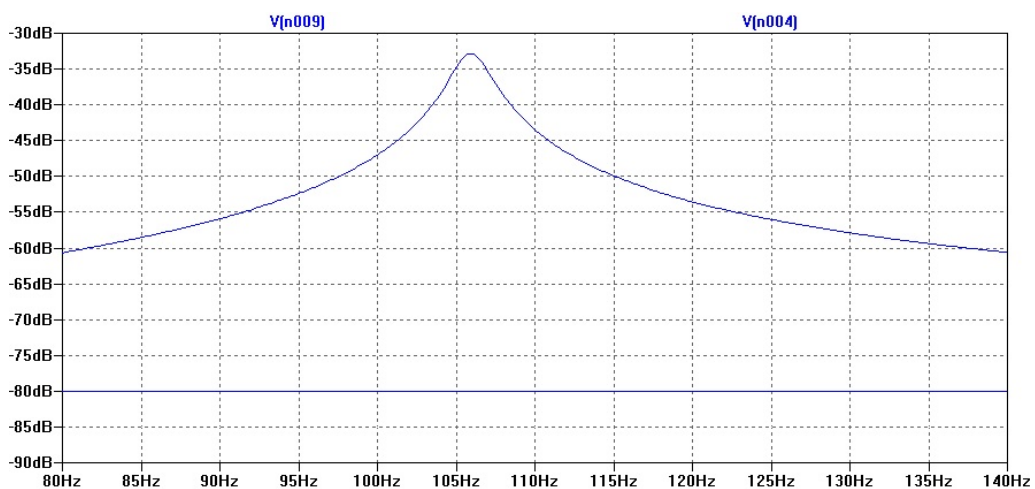


Рис. 3.34: "Средний" диапазон.

мой для реализации высокочастотных полосовых фильтров. Он обладает низкой поэлементной чувствительностью, не предъявляет высоких требований к ширине полосы пропускания операционного усилителя, а также прост в настройке. [70]

Для исследовательского этапа работ было выбрано три диапазона частот: "низкая 43 Гц, "средняя 111 Гц и "высокая 208 Гц.

Для настройки использовалась SPICE-модель. Амплитудно-частотные характеристики каскада, для каждого диапазона частот, приведены на рисунках (3.33 - 3.35). Коэффициент усиления каждого каскада примерно 40 дБ.

Активный фильтр состоит из двух каскадов. Результаты лабораторных испытаний приведены в табл. 3.4.

Фотография приемника со снятой защитной крышкой показана на рис. 3.36.

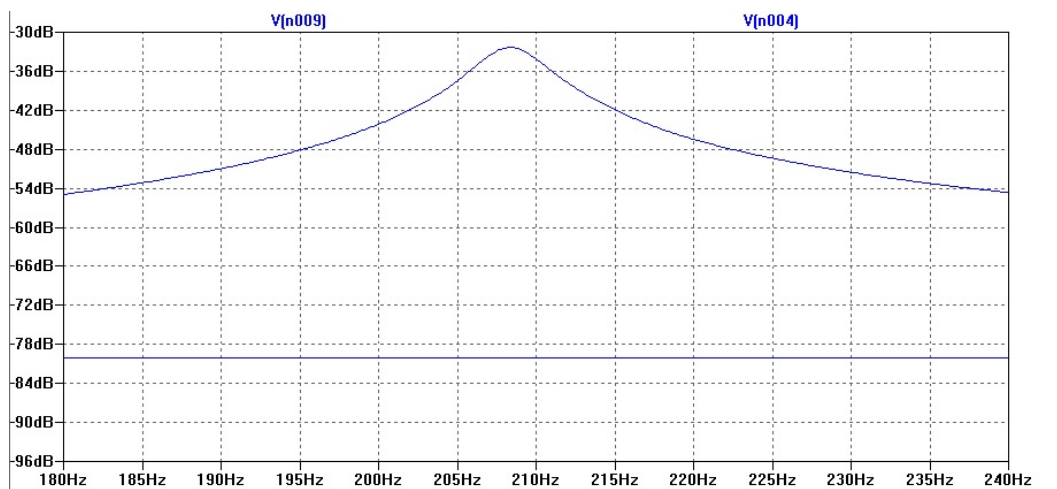


Рис. 3.35: "Высокий" диапазон.

Частота входного сигнала (Гц)	Амплитуда входного сигнала (мкВ)	Амплитуда выходного сигнала (мВ)	Коэффициент усиления	Коэффициент подавления промышленной частоты 50 Гц (дБ)	Уровень собственных шумов (дБ)
	100	1000	10 000		
43	30	450	15 000	35	- 100
	10	200	20 000		
	100	1000	10 000		
111	30	450	15 000	60	- 100
	10	200	20 000		
	100	1000	10 000		
208	30	450	15 000	80	- 100
	10	200	20 000		

Таблица 3.4: Параметры полосового усилителя.



Рис. 3.36: Приемник без крышки.

3.3.2 Цифровая обработка сигнала

Средства для интерактивного конструирования фильтров дает проектировщик Filter Design & Analysis Tool программы MATLAB. Он открывает окно рис. 3.37 с множеством полей и иных деталей интерфейса для выбора типа фильтра и его параметров, а также выбора средств визуализации проектирования фильтров. [71]

После задания типа фильтра и его параметров, можно автоматически получить программный код, позволяющий использовать выбранный фильтр в m-файлах.

Листинг 3.1: Функция расчета фильтра Баттерворта

```
% All frequency values are in Hz.
Fs = 10000; % Sampling Frequency
Fstop1 = 205; % First Stopband Frequency
Fpass1 = 207; % First Passband Frequency
Fpass2 = 209; % Second Passband Frequency
Fstop2 = 211; % Second Stopband Frequency
Astop1 = 20; % First Stopband Attenuation (dB)
Apass = 1; % Passband Ripple (dB)
Astop2 = 20; % Second Stopband Attenuation (dB)
```

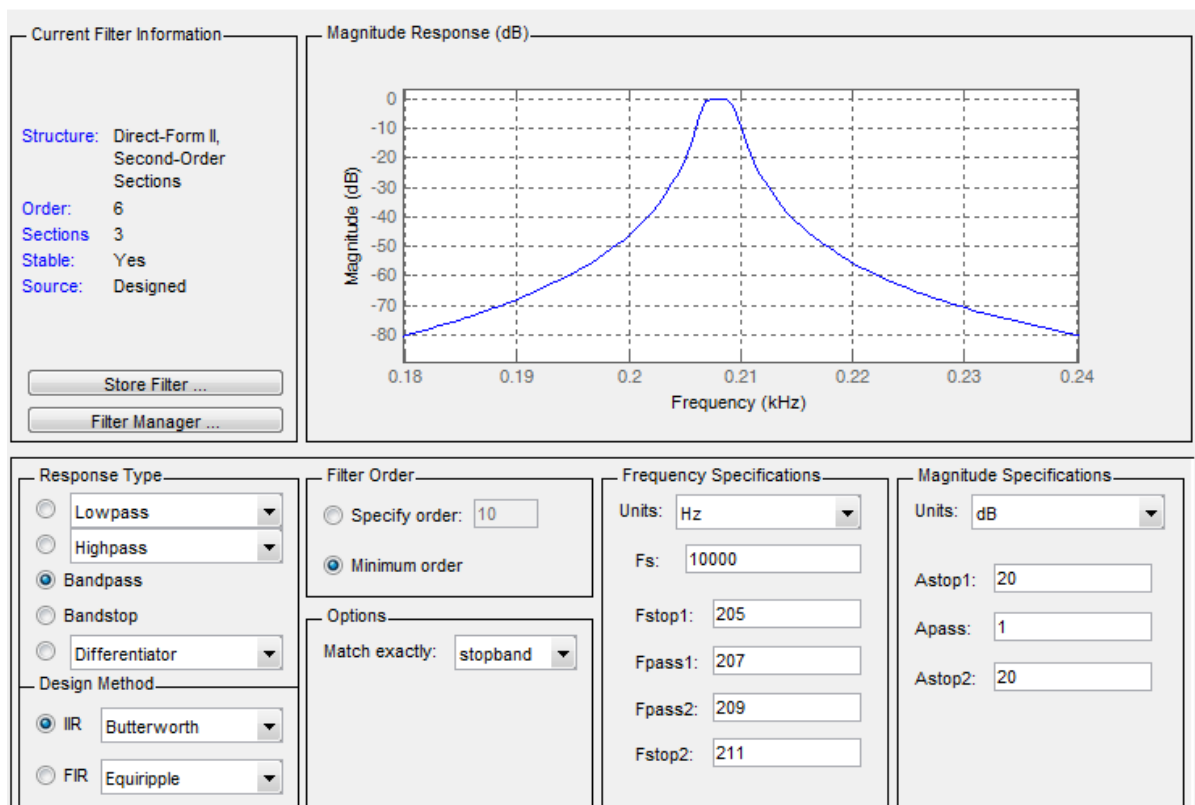


Рис. 3.37: Интерфейс программы настройки фильтра

```

match = 'stopband'; % Band to match exactly
% Construct an FDESIGN object and call its BUTTER method.
h = fdesign.bandpass(Fstop1, Fpass1, Fpass2, Fstop2, ...
                   Astop1, Apass, Astop2, Fs);
Hd = design(h, 'butter', 'MatchExactly', match);
% [EOF]

```

В работе был выбран БИХ фильтр Баттерворта, так как он обладает наиболее равномерной частотной характеристикой в полосе пропускания.

Выводы

1. Рассмотрены вопросы выбора двигателя сейсмоисточника, приведены методики расчетов для двигателей с электродинамическим и электромагнитным принципами действия. Был собран экспериментальный макет электродинамического двигателя, подтвердивший с достаточной точностью теоретические расчеты.

2. Предложено техническое решения для возбуждения гармонических колебаний электромагнитным двигателем при помощи короткоходного полиурета-

нового амортизатора.

3. Произведен анализ схем источников тока для заряда емкостного накопителя энергии, входящего в состав системы питания. Приведены методы сокращения времени заряда емкостного накопителя энергии и повешения КПД обратноходового преобразователя.

4. Обоснован выбор частотной характеристики и схема построения входного усилителя приемника. Использование активного фильтра позволяет уменьшить динамический диапазон АЦП, с другой стороны он несколько сдвигает возможности по регулировки частоты передатчика с целью нахождения оптимального баланса собственной резонансной частоты передатчика и полосы пропускания среды при заданных условиях.

5. Приведены методы проектирования цифровых фильтров. Для обработки входного сигнала подходит применение систем построенных по принципу SDR (software-defined radio). Низкая частота сигнала - до 500 Гц, позволяет использовать энерго эффективные встраиваемые микроконтроллеры, не обладающие высокой производительности, тем самым оптимизирую время автономной работы, габариты и стоимость решения.

Глава 4

Экспериментальные исследования и перспективы совершенствования

Внедрению любого наукоемкого оборудования предшествует прохождение множества испытаний подтверждающих жизнеспособность идей, заложенных разработчикам, выявления определенных закономерностей и в финальных испытаниях - соответствие заявленных характеристик требованиям заказчика.

В главе приведены данные экспериментальных исследований, дополняющие и иллюстрирующие описание сейсмического канала передачи сообщений. Дано описание методик, условий и особенностей экспериментальных исследований. Наличием устойчивого сигнала подтверждена работоспособность и перспективность канала связи при помощи модулированных сейсмических волн. Определены направления совершенствования технологии.

Основание для выполнения работ.

Договор №426ГС1/9729 от 14.04.2015 «О предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ» по теме: «Разработка технологии передачи данных, сигнализации и аварийной связи через горные породы подземных рудников и шахт на основе использования сейсмических волн»

Комплектность экспериментального макета аппаратуры канала связи:

- а) Система управления невзрывным маломощным источником сейсмических волн – 1 комплект;
- б) Система электропитания:
 - 1) 6 аккумуляторов емкостью 60 А·ч;
 - 2) силового накопительного конденсатора емкостью 2400 мкФ.
- в) Трехкомпонентные геофоны DS-20DX – 3 шт;
- г) Источник сейсмических волн;

- д) Приемник на базе ЭВМ;
- е) Приемник на основе телеметрической сейсмостанция SGD-SET (версия V3) для инженерных геофизических исследований;
- ж) Сейсмический 3-компонентный каротажный зонд;
- з) Импульсный невзрывной источник сейсмических волн с электромагнитным приводом «Енисей СЭМ-100» с калиброванной силой воздействия на грунт 1000кН;
- и) Импульсный невзрывной источник сейсмических волн с электромагнитным приводом «Енисей ВЭМ-50» с калиброванной силой воздействия на грунт 500кН.

4.1 Экспериментальные работы в угольной шахте «СУЭК-Кузбасс», П/Е «Шахта Комсомолец»

На данном этапе работ для количественной оценки энергетики канала связи, как основной его характеристики, использовались спектральные плотности мощности сигналов, шумов и их отношение (С/Ш).

Место проведения испытаний: г. Ленинск-Кузнецкий, Кемеровская обл., ОАО «СУЭК-Кузбасс», П/Е шахта «Комсомолец».

Время проведения испытаний: 25.06.2015 – 27.06.2015 гг.

Условия и порядок проведения испытаний:

- а) Подготовка площадки для установки сейсмоисточника размерами 600х600 мм², глубиной 300 мм, с ровным основанием;
- б) Установка сейсмоисточника на подготовленную площадку. В качестве пригруза используется легковой автомобиль. Конфигурация сейсмоисточника выполняется по схеме «пригруза индуктора»;
- в) Подключение системы электропитания и управления к сейсмоисточнику;
- г) Установка сейсмоприемника, подключенного к осциллографу, в непосредственной близости от излучателя с целью определения резонансных частот сейсмоисточника. Синтез управляющих частот производится с пульта управления;
- д) Поиск резонансных частот излучателя путем перестройки частоты опорного генератора и регистрации максимума сигнала с геофона. Рабочая частота излучателя задается от генератора сигналов в диапазоне от 40 до 250 Гц;
- е) Приемная часть аппаратуры опускается в шахту. 3-х компонентные сейсмо-

- приемники устанавливаются при помощи анкеров в специально перфорированные отверстия в бетонной конструкции горной крепи. Прием сигнала осуществляется на широкополосный усилитель с полосой пропускания от 1 до 1000 Гц и коэффициентами усиления $K_{u1} = 500$ и $K_{u2} = 5000$;
- ж) Регистрация помехового фона непосредственно в горной выработке. Время записи – 20 сек. Производится не менее 10 повторений;
 - з) По полученным данным о помеховой обстановке в шахте оперативно принимается решение об оптимальных рабочих частотах сейсмоисточника;
 - и) По телефонной связи оператор-исследователь, находящийся в горной выработке, сообщает требуемую рабочую частоту оператору-исследователю, находящемуся на поверхности. Согласовывается время записи сигнала;
 - к) Осуществляется передача сигнала с поверхности в горную выработку. Синхронизация работы передатчика (сейсмоисточника) и приемника производится по телефонной связи по команде «СТАРТ». На каждой частоте проводится не менее 5 повторений;
 - л) Выполняется обработка полученных данных.

4.1.1 Результаты испытаний на горизонте «-400м» , ствол №1

Схема эксперимента организована в соответствии с рис.4.1 (расстояние от источника до приемника по прямой $R=320$ м).

Конфигурация источника выполнена по схеме «пригруза индуктора». Резонансные частоты сейсмоисточника при данной подстилающем грунте составили: 130 Гц, 150 Гц. На этих частотах зарегистрирован наибольший уровень сигнала на поверхности и наилучшая стабильность излучения сейсмоизлучателя во времени. В частности, определено, что: - на частоте 130 Гц излучатель стабильно работает в течение 10 сек; - на частоте 150 Гц излучатель стабильно работает в течение 10 сек, что позволяет весьма эффективно использовать ресурс накопления энергии сигнала во времени для повышения отношения С/Ш лишь в течение 10 сек, при времени записи $T=20$ сек.

На основании проведенных испытаний установлено, что в спектральной характеристике, излучаемого сигнала помимо основной частоты от задающего генератора присутствует множество побочных гармонических составляющих – механических резонансов деталей излучателя.

Результаты записи спектральной плотности приведены на рис. 4.3. Время измерения – 20 сек; количество повторений – 5, коэффициент усиления $K_{u2} = 5000$.

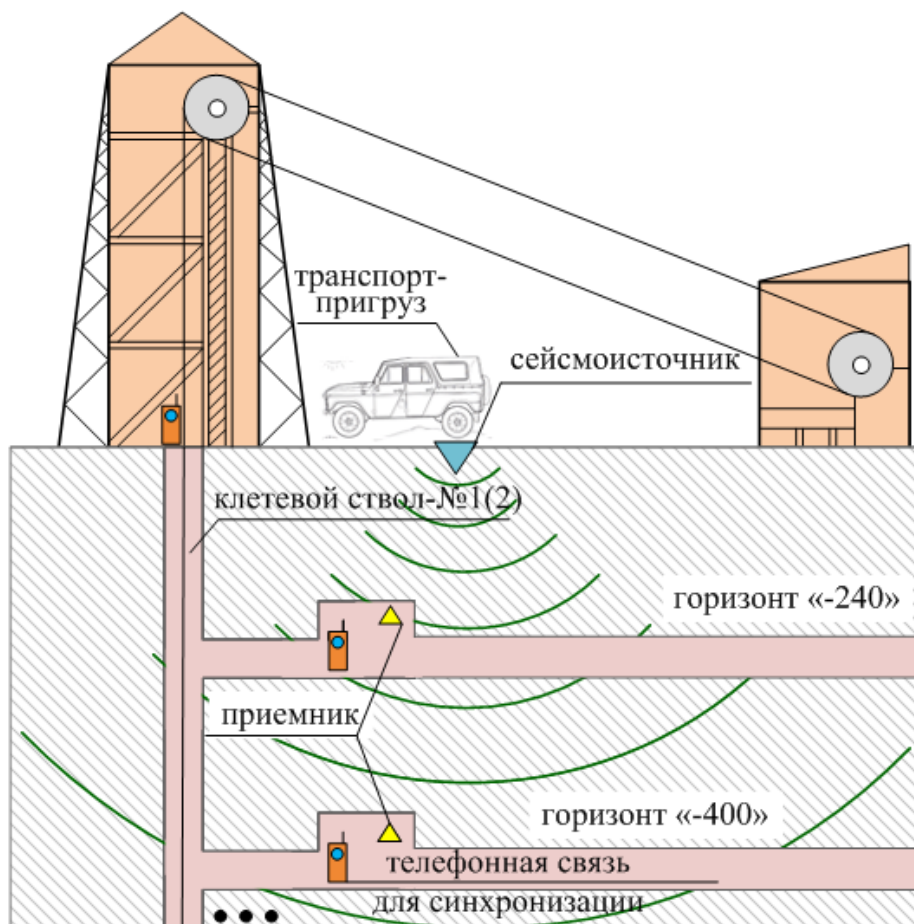


Рис. 4.1: Схема эксперимента на шахте «Комсомолец», г. Ленинск-Кузнецкий.



Рис. 4.2: Ствол №1 шахты «Комсомолец», ОАО «СУЭК-Кузбасс». Сейсмический излучатель.

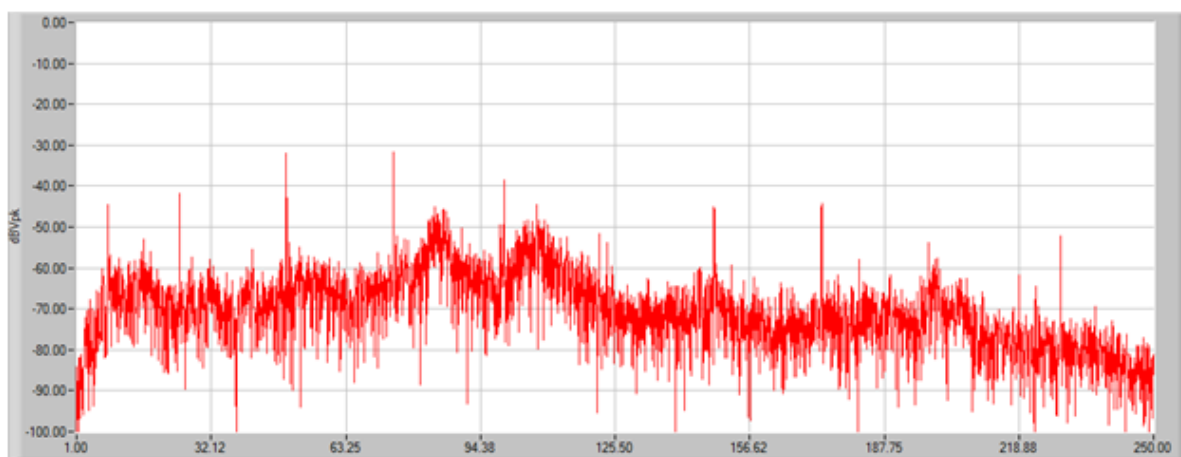


Рис. 4.3: Спектральная плотность шума на горизонте «-400м»; ствол №1 ($K_{u2} = 5000$).

Частота сигнала	Время записи (накопления)	Количество измерений	Отношение сигнал/шум
130 Гц	20 сек	5	< 1дБ
130 Гц	30 сек	5	< 1дБ
150 Гц	20 сек	5	< 1дБ
150 Гц	30 сек	5	< 1дБ

Таблица 4.1: Результаты измерений на горизонте -400 м

Анализ спектральной плотности шума показал наличие мощных периодических помех частотой кратной 25 Гц. Также в спектре присутствует интенсивная импульсная сейсмическая помеха с частотой повторения 8 Гц (возможно является результатом неисправности шарикоподшипниковой детали вращающегося механизма вентиляционной установки). Для передачи сигнала принято решение работать на резонансных частотах сейсмоисточника – 130 Гц и 150 Гц.

Выводы испытаний:

- а) По результатам серии экспериментов, проведенных на стволе №1, горизонт «-400 м» можно сделать заключение, что при существующей мощности сейсмоисточника и такой спектральной плотности шума, детектировать узкополосный сигнал на частотах 130 и 150 Гц на приемной стороне не представляется возможным;
- б) С учетом теоретических сведений о зависимости коэффициента затухания сейсмических волн в горных породах от частоты, последующие эксперименты следует проводить в том числе в диапазоне частот ниже 100 Гц.

4.1.2 Результаты испытаний на горизонте «-240 м», ствол №2

Схема эксперимента организована в соответствии с рис.4.1 (расстояние от источника до приемника по прямой $S=160$ м).



Рис. 4.4: Экспериментальная установка в районе ствола №2.

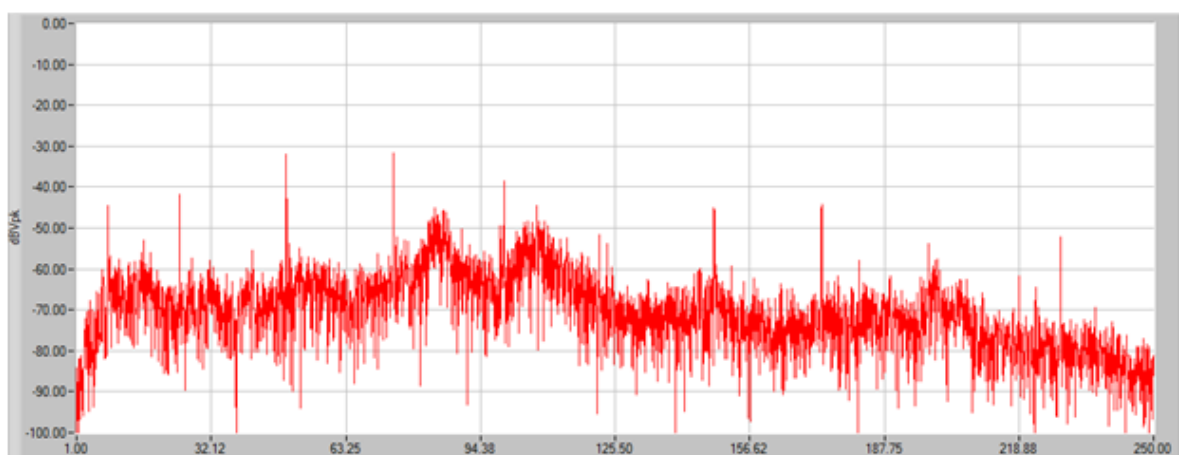


Рис. 4.5: Спектральная плотность шума на горизонте «-240 м»; ствол №2 ($K_{u2} = 500$).

Схема конфигурации источника – «пригруз индуктора». Резонансные частоты сейсмоисточника при данной подстилающей поверхности составили: 130 Гц, 150 Гц. В частности, определено, что: - на частоте 130 Гц излучатель стабильно работает в течение не менее 8 сек; - на частоте 150 Гц излучатель стабильно работает в течение не менее 10 сек, что не позволяет достаточно эффективно использовать ресурс накопления во времени для повышения отношения С/Ш, при времени записи $T=20$ сек.

Результаты записи спектральной плотности приведены на рис. 4.5. Время измерения – 20 сек; количество повторений – 5, $K_{u2} = 500$.

Анализ спектральной плотности шума показал наличие мощных периодических помех с частотой кратной 25 Гц (аналогично данным, полученным на

Частота сигнала	Время записи (накопления)	Количество измерений	Отношение сигнал/шум
130 Гц	20 сек	5	С/Ш < 1дБ
130 Гц	30 сек	5	С/Ш < 1дБ
155 Гц	20 сек	5	С/Ш < 1дБ
155 Гц	30 сек	5	С/Ш < 1дБ
70 Гц	20 сек	5	1дБ < С/Ш < 4дБ
90 Гц	30 сек	5	1дБ < С/Ш < 4дБ
70 Гц	20 сек	5	1дБ < С/Ш < 4дБ
90 Гц	30 сек	5	1дБ < С/Ш < 5дБ

Таблица 4.2: Результаты измерений на горизонте 240 м"

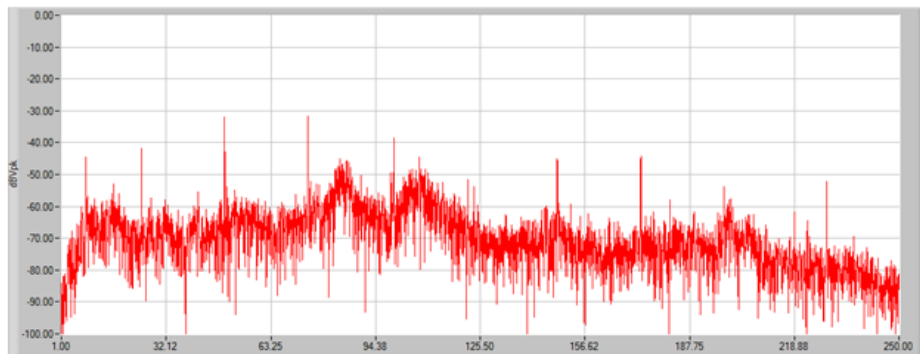


Рис. 4.6: Спектральная характеристика, полученная из реализации длительностью 20 с, при работе излучателя на частоте 70 Гц, $K_{u2} = 500$.

горизонте «-400», ствол №1). Однако на горизонте «-240» в спектре шума не просматривается мощная импульсная сейсмическая помеха. Средний уровень шумового фона в низкочастотном диапазоне на стволе №2 ниже, чем на стволе №1.

Аналогично горизонту «-400» на горизонте «-240» принято решение работать на резонансных частотах сейсмоисточника – 130 Гц и 150 Гц.

На основании, полученной спектральной плотности шума (рис. 4.5) для проверки возможности передачи сигнала сквозь породу дополнительно выбраны частоты 70 Гц и 90 Гц. Эффективность работы сейсмоисточника на частотах 70 Гц и 90 Гц оказалась ниже, чем на частотах 130 Гц и 150 Гц, как по уровню (на 10-16 дБ), так и по времени стабильной работы: - на частоте 70 Гц излучатель стабильно работает в течение не более 5 сек; - на частоте 90 Гц излучатель стабильно работает в течение не более 7 сек, что, в условиях достаточно высокого уровня широкополосного шума и узкополосных помех в горной выработке, существенно ограничивает возможность исследования канала связи на частотах ниже 100 Гц.

Проведена серия измерений на частотах 120 Гц, 150 Гц, 90 Гц, 70 Гц (рис.4.6, 4.7). Результаты измерений сведены в табл. 4.2.

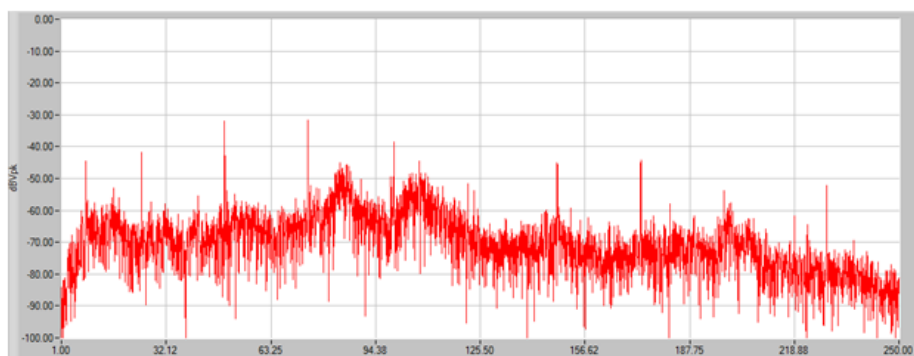


Рис. 4.7: Спектральная характеристика, полученная из реализации длительностью 20 с, при работе излучателя на частоте 90 Гц, $K_{u2} = 500$.

Выводы испытаний:

- а) По результатам серии экспериментов, проведенных на стволе №1, горизонт «-400м» можно сделать заключение, что при существующей мощности сейсмоисточника и такой спектральной плотности шума, детектировать узкополосный сигнал на частотах 130 и 150 Гц на приемной стороне не представляется возможным;
- б) С учетом теоретических сведений о зависимости коэффициента затухания сейсмических волн в горных породах от частоты, последующие эксперименты следует проводить в том числе в диапазоне частот ниже 100 Гц.

4.1.3 Общий анализ результатов испытаний и рекомендаций в угольной шахте СУЭК Кузбасс.

- а) По результатам 2 дней испытаний общее время непрерывной работы сейсмоисточника в режиме излучения без подзарядки аккумуляторов составило $t = 5$ часов.
- б) Получены экспериментальные характеристики шумового фона в реальных условиях горной выработки, анализ которых позволит впоследствии определить оптимальные частоты работы сейсмического излучателя и, соответственно, доработать его конструкцию.
- в) Установлено, что источник обладает достаточно «грязной» спектральной характеристикой, т. е. помимо основной частоты задающего генератора, в грунте возбуждается большое количество побочных гармонических составляющих. Причем, при работе на низких частотах (ниже 100 Гц) уровень субгармоник, как правило, оказывается выше уровня основной составляющей. Данный факт требует дополнительного изучения сейсмоисточника в лабораторных условиях.

- г) По результатам обработки экспериментальных результатов, полученных на стволах №1 и №2 (горизонты «-400 м» и «-240 м» соответственно) можно заключить, что выделить сигнал на частотах 130 и 150 Гц не удалось.
- д) Несмотря на то, что при определенном времени накопления (12-14 сек.) отношение С/Ш в максимуме достигает 4 дБ и 5 дБ для 70 Гц и 90 Гц. Требуется совершенствование сейсмоисточника для обеспечения более стабильной его работы и использования ресурса накопления энергии сигнала во времени.
- е) Резонансную частоту сейсмоисточника требуется обеспечить в диапазоне частот ниже 100 Гц, так как на низких частотах волны обладают меньшим затуханием.
- ж) В последующих экспериментальных работах необходимо апробировать схему конфигурации сейсмического источника с «пригрузом якоря».
- з) Вследствие того, что одним из основных факторов, влияющих на дальность распространения сейсмических волн, является наличие границ раздела, вызывающих их отражение (и соответствующее ослабление), требуется провести эксперименты по передаче сигнала при условии установки сейсмоприемников непосредственно в горную породу. Таким образом можно избежать ослабления сигнала на границе горной крепи и породы.
- и) Помимо границы раздела «горная крепь – горная порода» существенное затухание может дать стратификация геологического разреза. Требуется провести серию экспериментальных работ на геофизическом полигоне с известным георазрезом для установления взаимозависимости ослабления сигнала от наличия границ раздела.

4.2 Экспериментальные работы в рудной шахте «Абаканский рудник»

Экспериментальные работы на руднике велись с учетом ранее проведенных натуральных испытаний на угольной шахте «Комсомолец», ОАО «СУЭК-Кузбасс». В частности, проведена доработка сейсмоисточника в соответствии с выводами и рекомендациями.

Место проведения испытаний: г. Абаза, респ. Хакасия., ООО «Абаканский рудник».

Время проведения испытаний: 01.07.2015 г.

Условия и порядок проведения испытаний:

- а) Подготовка площадки с ровным основанием, размерами 600х600 мм², глубиной 50 мм для установки сейсмоисточника;
- б) Сейсмоисточник устанавливается в подготовленное углубление 50 мм с выравненным дном, верхняя опорная плита придавливается сверху автомобилем. Реализуется схема «пригруза якоря»;
- в) Подключение системы электропитания и управления к сейсмоисточнику;
- г) Установка сейсмоприемника, подключенного к осциллографу, в непосредственной близости от излучателя с целью определения резонансных частот сейсмоисточника. Синтез управляющих частот производится с пульта управления;
- д) Поиск резонансных частот излучателя путем перестройки частоты опорного генератора и регистрации максимума сигнала с геофона. Рабочие частоты излучателя задаются в диапазоне от 40 до 180 Гц;
- е) Приемная часть аппаратуры опускается в шахту. 3-х компонентные сейсмоприемники устанавливаются при помощи анкеров в специально перфорированные отверстия в бетонной конструкции горной крепи. Прием сигналов осуществляется на широкополосный усилитель с полосой пропускания от 1 до 1000 Гц и коэффициентами усиления $K_{u1} = 500$ и $K_{u2} = 5000$;
- ж) Производится регистрация помехового фона непосредственно в горной выработке. Время записи – 20 сек. Производится не менее 10 повторений;
- з) По полученным данным о помеховой обстановке в шахте оператором-исследователем на месте принимается решение об оптимальных частотах канала связи;
- и) По телефонной связи оператор-исследователь, находящийся в горной выработке, сообщает требуемую рабочую частоту оператору-исследователю, находящемуся на поверхности. Согласовывается время записи сигнала.
- к) Осуществляется передача сигнала с поверхности в горную выработку. По команде «СТАРТ» обеспечивается синхронизация включения сейсмоисточника и начало записи на приемной стороне. На каждой частоте проводится не менее 5 повторений.
- л) Выполняется обработка полученных данных.

4.2.1 Результаты испытаний на горизонте «537 м», глубина – 50 м.

Схема эксперимента организована в соответствии с рис.4.8 (расстояние от источника до приемника по прямой $R=60$ м).

В отличие от проведенных ранее испытаний на угольной шахте, в руднике применена схема «пригруза якоря» источника.

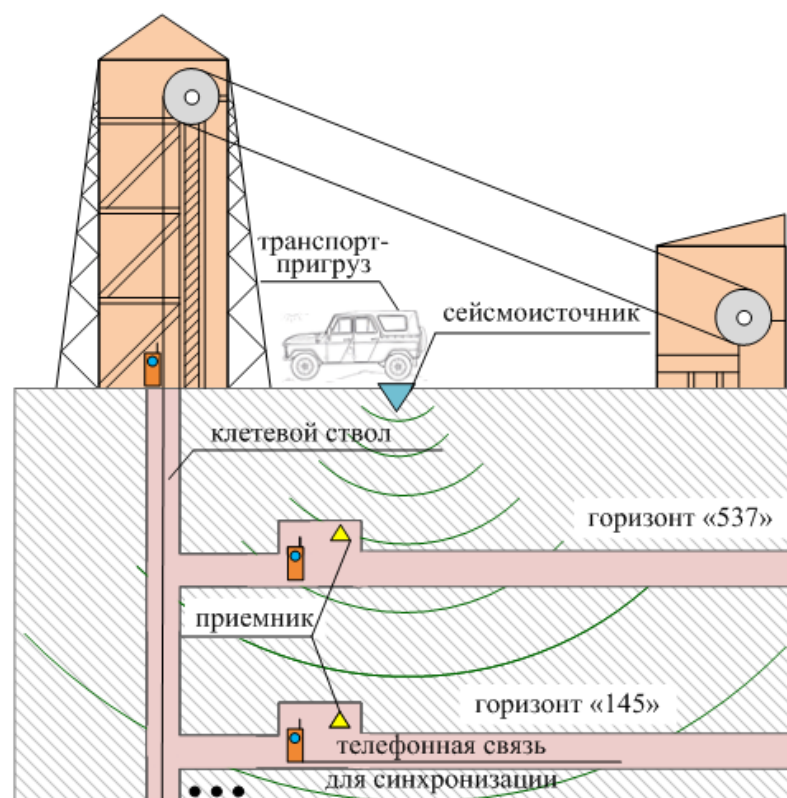


Рис. 4.8: Схема эксперимента на «Абаканском руднике», г. Абаза, респ. Хакасия.

С помощью установленного в непосредственной близости геофона были определены 3 резонансные частоты сейсмоисточника: 178 Гц, 164 Гц и 90.3 Гц. Для данных частот установлен наибольший уровень сигнала на поверхности и наилучшая стабильность излучения сейсмоизлучателя во времени. В частности, определено, что: - на частоте 164 Гц излучатель стабильно работает в течение не менее 12 сек; - на частоте 178 Гц излучатель стабильно работает в течение не менее 14 сек; - на частоте 90,3 Гц время стабильной работы не менее 8 сек.

На основании проведенных испытаний установлено, что в спектральной характеристике, снимаемой с сеймоприемника, помимо основной частоты от задающего генератора, присутствует достаточно богатый спектр побочных гармонических составляющих – побочных резонансов.

Непосредственно в руднике при помощи анкерных болтов в бетонный каркас горной крепи устанавливались 3-х компонентные геофоны. Сигнал проходил через широкополосный усилитель 37 дБ ($K_{u2} = 5000$) и поступал на вход USB-АЦП. Частота дискретизации – 10000 Гц, время записи сигнала – 20 сек. Результаты записи спектральной плотности шумов в руднике приведены на рис. 4.9. Число повторений – 5.

Анализ спектральной плотности шума показал наличие мощных периодических помех на частотах, 25 Гц, 38 Гц, 78 Гц, 172 Гц, вызванных вибрациями

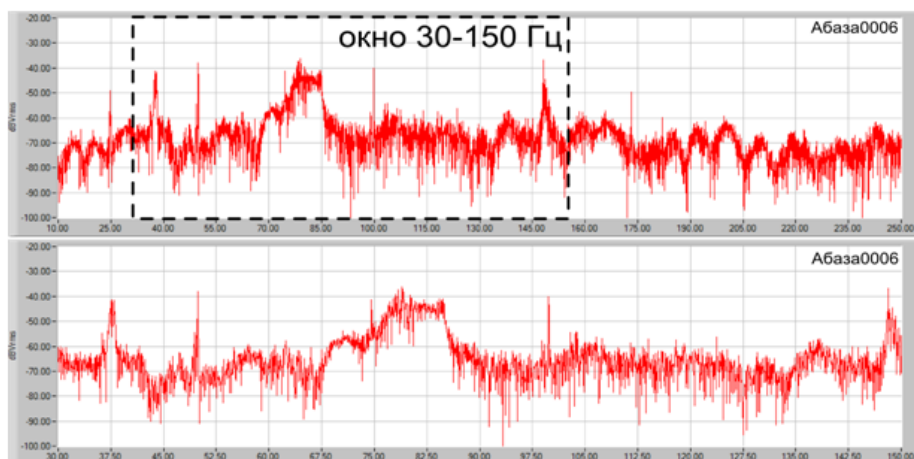


Рис. 4.9: Спектральная плотность шума на горизонте «-537 м»; ($K_{u2} = 5000$).

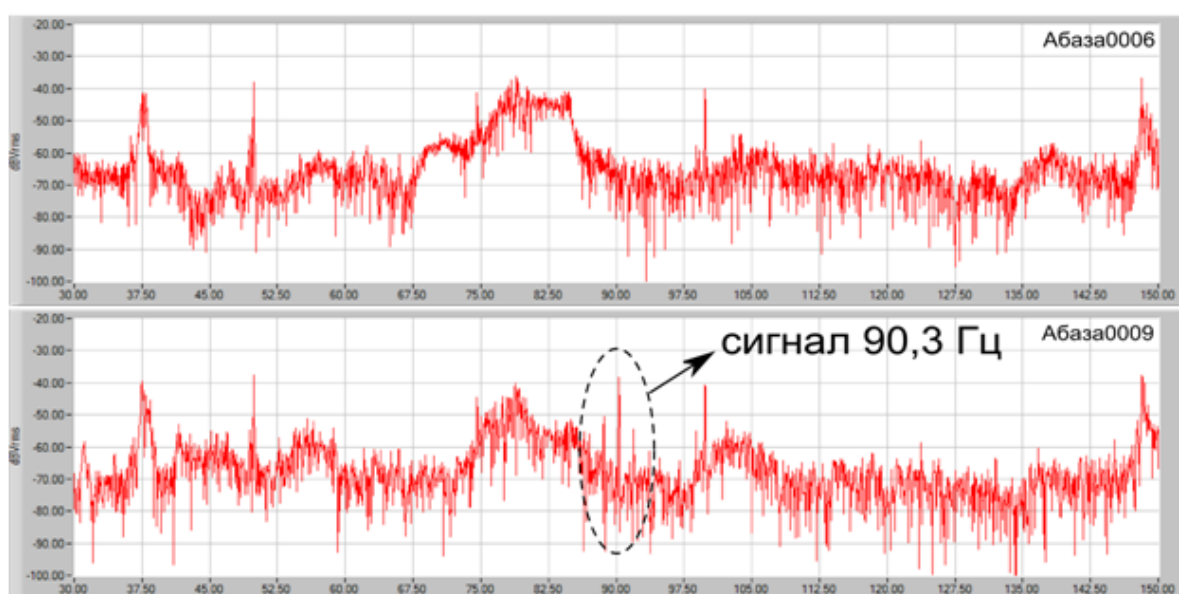


Рис. 4.10: Спектральная характеристика при отключенном (верхний рисунок) и работающем на частоте 90,3 Гц излучателе (нижний рисунок) на горизонте «537 м»; ($K_{u2} = 5000$).

от работы шахтного оборудования, а также частотах, кратных 50 Гц (сетевая помеха). Наиболее интенсивный помеховый фон спектре присутствует в полосе частот 70-85 Гц (широкополосные импульсные помехи). Для улучшения наглядности сигнала на фоне шумов было выбрано окно шириной 120 Гц (рис.9). Спектральная плотность шума на частоте 90 Гц составляет -65 дБ/Гц. На основе спектральных характеристик шума можно заключить, что использование в качестве несущей частоты сигнала резонансных частот сейсмоисточника: 178 Гц, 164 Гц и 90.3 Гц является целесообразным.

Проведена серия измерений на частотах 178 Гц, 164 Гц и 90,3 Гц. Результаты измерений сведены в табл.4.3. Глубина – 50 м.

Выводы испытаний:

Амплитуда несущей сигнала на частоте 90,3 Гц (рис. 4.10) составляет -37.5

Частота сигнала	Время записи (накопления)	Количество измерений	Отношение сигнал/шум
178 Гц	20 сек	5	С/Ш < 1дБ
178 Гц	30 сек	5	С/Ш < 1дБ
164 Гц	20 сек	5	С/Ш < 1дБ
164 Гц	30 сек	5	С/Ш < 1дБ
90.3 Гц	20 сек	10	С/Ш > 27.5 дБ
90.3 Гц	30 сек	10	С/Ш > 27.5 дБ

Таблица 4.3: Результаты измерений на горизонте "537 м"

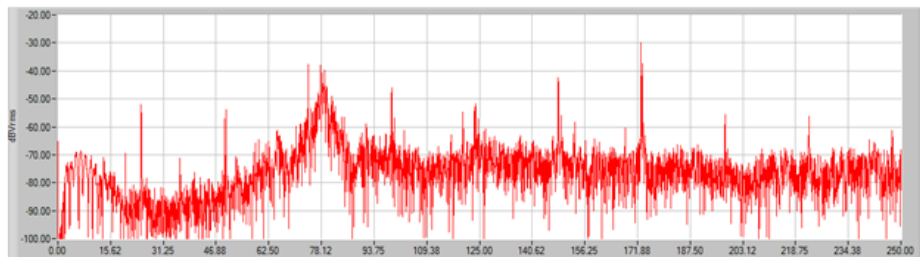


Рис. 4.11: Спектральная плотность шума на горизонте «145 м» ($K_{u2} = 5000$).

дБ, отчетливо видны верхняя и нижняя боковые частоты ($90,3 \pm 1,6$ Гц), свойственные амплитудной модуляции.

В данном случае возникновение модуляции в спектре является паразитным явлением, вызванным нестабильностью сейсмоисточника. Паразитная модуляция и нестабильность излучателя отнимают значительную часть мощности излучаемого сигнала и снижают энергетическую эффективность источника.

При спектральной плотности шума -65 дБ/Гц в окрестности частоты 90 Гц отношение сигнал/шум по мощности составляет $27,5$ дБ на расстоянии порядка 60 метров, при работе на частоте $90,3$ Гц и времени накопления 20 сек.

4.2.2 Результаты испытаний на горизонте «145 м», глубина - 450 метров

На горизонте «145 м» проводилась только запись спектральной плотности шума. Испытания в режиме передачи сигнала не проводились. Схема конфигурации сейсмоисточника и его местоположение не менялись.

Результаты записи спектральной плотности приведены на рис. 4.11. Время измерения – 20 сек; количество повторений – 5 , $K_{u2} = 5000$.

Выводы испытаний:

Анализ спектральной плотности шума показал наличие мощных периодических помех с частотой кратной 25 Гц, а также сетевых помех на частотах, кратных 50 Гц (аналогично данным, полученным на горизонте «537»). Также

присутствует интенсивный шумовой фон в полосе частот 70-85 Гц (широкополосные импульсные помехи).

4.2.3 Общий анализ результатов испытаний в рудной шахте "Абаканский рудник".

- а) По результатам обработки экспериментальных результатов по передаче сигнала, полученных на горизонте №1 («537 м») можно заключить, что на частоте 90,3 Гц, несмотря на менее эффективную работу излучателя, сигнал на дальности порядка $R=60$ м удалось принять и детектировать на приемной стороне.
- б) Напротив, выделить сигнал на частотах 164 и 178 Гц на фоне шумов не удалось.
- в) По результатам испытаний общее время непрерывной работы сейсмоисточника в режиме излучения без подзарядки аккумуляторов составило $t = 3$ часа.
- г) Получены экспериментальные характеристики шумового фона в реальных условиях горной выработки на разных глубинах: 50 м – горизонт «537», 450 м – горизонт «145».
- д) Установлено, что сейсмоисточник работает достаточно нестабильно, возбуждаются побочные гармоники. В результате, 20-секундное накопление является формальным, поскольку нестабильная работа источника не позволяет осуществлять суммирование энергии сигнала на протяжении всей реализации.
- е) В последующих экспериментальных работах необходимо опробовать схему конфигурации сейсмического источника с «пригрузом якоря без инертной массы».
- ж) Наряду с полученными ранее спектральными характеристиками в угольной шахте можно заключить, что оптимальные резонансные частоты генератора целесообразно обеспечить вблизи 60 Гц и 90 Гц.
- з) Дальнейшие эксперименты по передаче сигнала следует провести при условии установки сейсмоисточника непосредственно в горную выработку. При этом нужно обеспечить непосредственный контакт сейсмоисточника с горной породой, чтобы избежать потерь на границе раздела «горная крепь – горная порода».
- и) Требуется провести серию экспериментальных работ на геофизическом полигоне с известным георазрезом для установления взаимозависимости

ослабления сейсмического сигнала и наличия границ раздела.

- к) Последующие испытания по проверке дальности связи на производственных объектах нужно проводить при условии известной стратификации разреза горных пород в месте проведения эксперимента для учета потерь, связанных с отражением сейсмических волн от неоднородностей, и получения более точной картины.

4.3 Экспериментальные работы на Минусинском учебно-испытательном геофизическом полигоне

Серию экспериментов на геофизическом полигоне решено провести в соответствии с выводами и рекомендациями, данными по результатам проведенных ранее испытаний.

Место проведения испытаний: Минусинский учебно-испытательный геофизический полигон (МнУИГЦ), филиал ООО «Эвенкиягеофизика», г. Минусинск, Красноярский край.

Время проведения испытаний: 29.07.2015 – 30.07.2015 гг.

Условия и порядок проведения испытаний:

Испытания на МнУИГЦ проводились с помощью каротажного сейсмического зонда на скважинах глубиной 100 м и 300 м соответственно. Обсадка обеих скважин выполнена на глубине до 10 м, следовательно эффект передачи сигнала по обсадной трубе на глубину свыше 10 м исключен. По результатам испытаний, проведенных ранее на угольной шахте «Комсомолец» в г. Ленинск-Кузнецкий Кемеровской обл. и «Абканском руднике» в г. Абаза респ. Хакасия была сделана корректировка технических решений в конструкции сейсмического передатчика. Внесенные изменения в конструкцию сейсмоисточника позволили добиться существенного увеличения его энергетической эффективности на частотах ниже 100 Гц, а также уменьшить количество побочных резонансов. В частности, приемлемую стабильность в работе удалось получить на частотах 60 Гц и 90 Гц. Схема эксперимента приведена на рис. 4.12.

Натурные испытания выполнялись в следующем порядке:

- а) Подготовка площадки с ровным основанием, размерами 600x600 мм², глубиной 35 см для установки сейсмоисточника. Местоположение площадки находится в непосредственной близости от скважины «100».
- б) Сейсмоисточник устанавливается в подготовленное углубление 35 см с выравненным дном, верхняя опорная плита придавливается сверху автомоби-

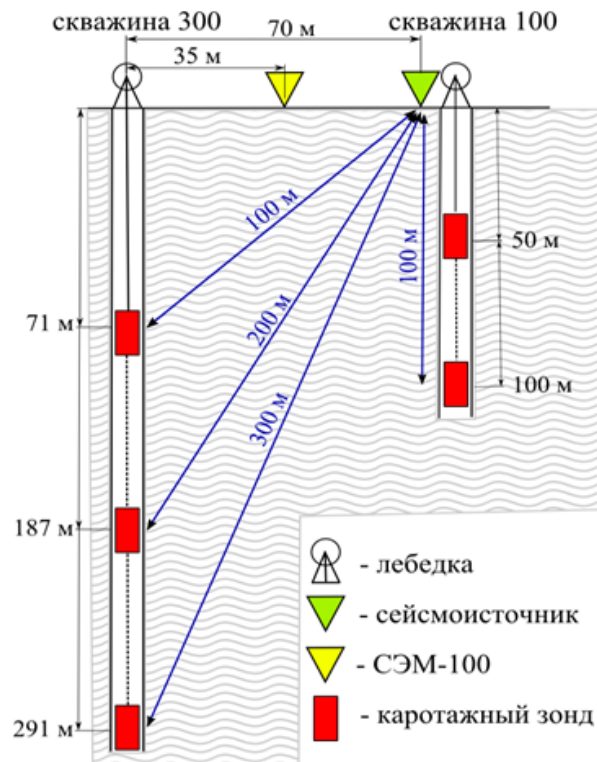


Рис. 4.12: Схема эксперимента на 100- и 300-метровой скважинах МнУИГЦ, г. Минусинск, Красноярский край с использованием малогабаритного сейсмоисточника и невзрывного импульсного источника с электромагнитным приводом СЭМ-100.

лем. Реализуется схема «пригрузки якоря без инертной массы» (рис. 4.13).

В процессе испытаний местоположение сейсмоисточника не изменяется.

- в) Подключение системы электропитания и управления сейсмоисточником.
- г) Установка 1-компонентного сейсмоприемника, подключенного к осциллографу, в непосредственной близости от излучателя для проверки эффективности излучения сейсмоисточника на частотах 60 и 90 Гц, а также в режиме линейно-частотной модуляции при изменении частоты во времени от $F_{min} = 83$ Гц до $F_{max} = 90$ Гц. Синтез управляющих частот производится с пульта системы управления.
- д) Производится поиск резонансных частот излучателя путем перестройки частоты опорного генератора и регистрации максимума сигнала с геофона. Сканирование резонансных частот осуществляется в диапазоне от 10 до 160 Гц.
- е) Сейсмический 3-х компонентный каротажный зонд на лебедке опускается в скважину на заданную оператором глубину (рис. 4.13). Прием сигнала осуществляется на телеметрическую инженерную сейсмостанцию SGD-SET со встроенным широкополосным усилителем с коэффициентом усиления $K_u = 2000$ и частотой дискретизации 4 кГц.
- ж) Синхронизация работы сейсмоисточника и приемного тракта аппаратуры



Рис. 4.13: Экспериментальный макет во время испытаний на МнУИГЦ. Слева – сейсмический зонд, погружаемый в скважину. Справа – сейсмоисточник с пригрузом и приемник на базе сейсмостанции.

осуществляется по команде «СТАРТ» оператором сейсмостанции.

- з) Передача гармонического сигнала на заданную глубину производится с помощью малогабаритного сейсмоисточника, работающего в вибрационном режиме на частотах 60 Гц и 90 Гц. Время регистрации сигнала $t=0,5$ сек. Количество измерений на каждой частоте – не менее 5. Регистрируются X, Y и Z – компоненты.
- и) Делается опыт по передаче сигнала на заданную глубину в импульсном режиме спомощью мощного импульсного невзрывного источника серии «Енисей» ВЭМ-50 или СЭМ-100 с силой воздействия на грунт $P = 500$ кН и $P = 1000$ кН соответственно.
- к) Производится передача элементарного сообщения (1 бита информации). Сейсмоисточник излучает в режиме линейно-частотной модуляции (ЛЧМ). Длительность импульса – $T = 0,5$ сек. Изменение частоты ЛЧМ в течение периода времени: от $F_{min} = 83$ Гц до $F_{max} = 90$ Гц.
- л) Выполняется обработка полученных данных.

4.3.1 Результаты испытаний на скважине «100».

Схема эксперимента организована в соответствии с рис.4.12.

В отличие от проведенных ранее испытаний на угольной шахте и в руднике, на МнУИГЦ реализована схема «пригрузки якоря без инертной массы».

Определены 3 резонансные частоты сейсмоисточника: 60 Гц, 90 Гц и 120 Гц. Для данных частот зарегистрирован наибольший уровень сигнала на поверх-

ности и наилучшая стабильность излучения сейсмоизлучателя во времени. В частности, определено, что: - на частоте 60 Гц время стабильной работы не менее 30 сек; - на частоте 90 Гц время стабильной работы не менее 60 сек; - на частоте 120 Гц время стабильной работы не менее 60 сек.

На основании проведенных испытаний установлено, что в спектральной характеристике сейсмоисточника превалирует основные гармоники (60 Гц, 90 Гц или 120 Гц), имеющие уровень существенно выше (до 20 дБ) побочных гармонических составляющих.

Скважинный зонд по команде с телеметрической сейсмостанции закрепляется в точке на глубине 50 м. Прием сигналов частотой 60 Гц и 90 Гц с каротажного снаряда осуществляется через трос-кабель на вход сейсмостанции SGD-SET (V3) с внутренним усилением 36 дБ и частотой дискретизации 4000 Гц.

Результаты экспериментов сведены в таблицу 4.34, а также в виде спектральных характеристик представлены на рис. 4.14 – 4.15.

Для наглядности, сигналы во временной области дополнительно пропускаются через полосовой фильтр Баттерворта 2-го порядка, ширина полосы 20 Гц, неровность полосы пропускания 1 дБ, подавление вне полосы пропускания – 6 дБ.

Анализ спектральных характеристик сигналов позволяет сделать заключение о том, что на 50-метровой отметке в скважине № 1 сигналы с частотами 59 Гц и 90 Гц отчетливо присутствуют на глубине 50 м. Отношение сигнал/шум в интересующей полосе составляет не менее 30 дБ при времени накопления 0,5 сек рис.4.14 – 4.15.

По команде с телеметрической сейсмостанции каротажный зонд опускается в самую нижнюю точку скважины «100м» и закрепляется на глубине 100 м. Прием сигналов частотой 60 Гц и 90 Гц с зонда осуществляется на вход сейсмостанции SGD-SET (V3) при включенном усилении 36 дБ.

Результаты экспериментов на 100-метровой отметке сведены в таблицу 4.34, а также в виде спектральных характеристик представлены на рис.4.16 – 4.17.

Во временной области сигналы пропускались через полосовой фильтр Баттерворта 2-го порядка с шириной полосы 20 Гц, неровностью полосы пропускания 1 дБ, подавлением вне полосы 6 дБ.

На 100-метровой отметке отработан режим передачи сигнала в импульсном режиме с помощью водного варианта импульсного невзрывного источника ВЭМ-50 в составе специализированного стенда для испытаний водных источников (рис.4.18).

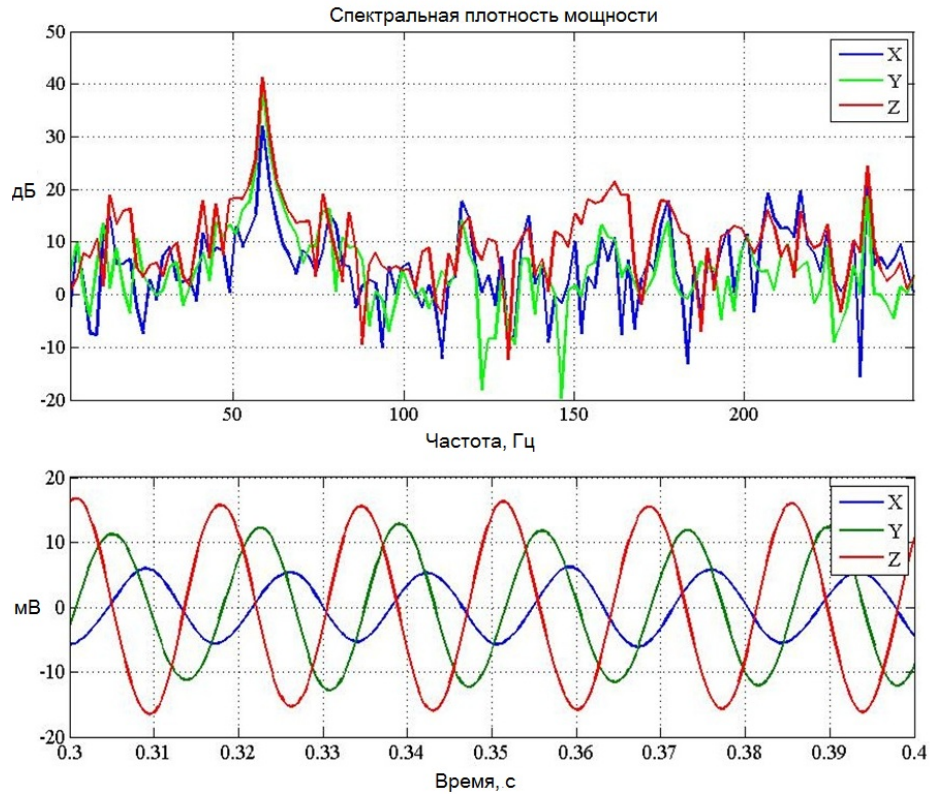


Рис. 4.14: Скважина «100 м». Частота сигнала – 59 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 50 м; дистанция от источника до приемника – 50 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

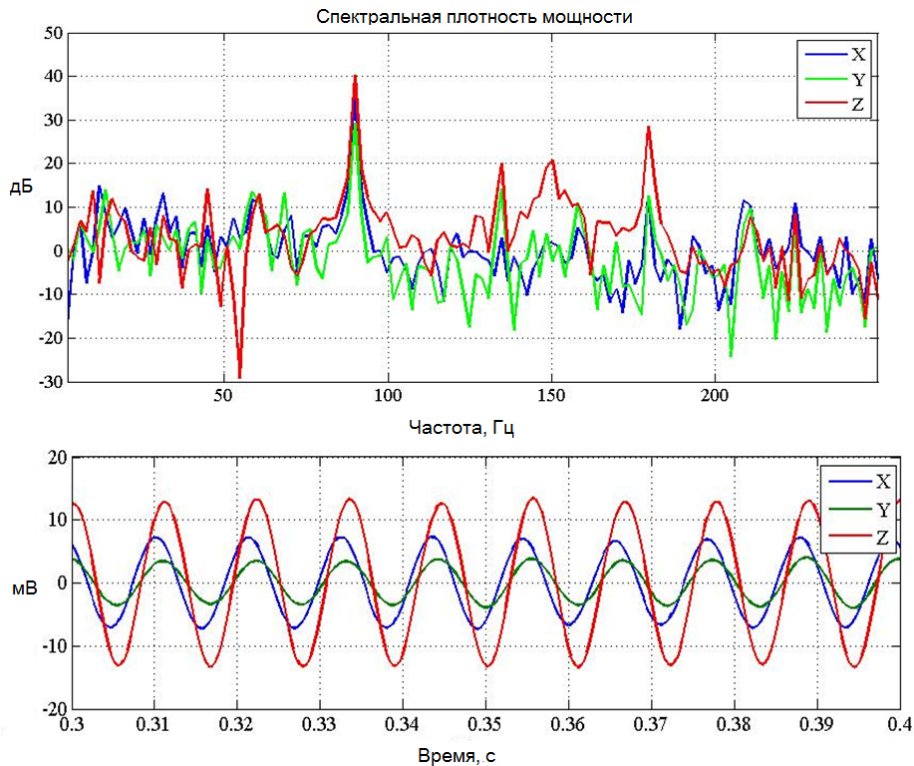


Рис. 4.15: Скважина «100 м». Частота сигнала – 90 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 50 м; дистанция от источника до приемника – 50 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

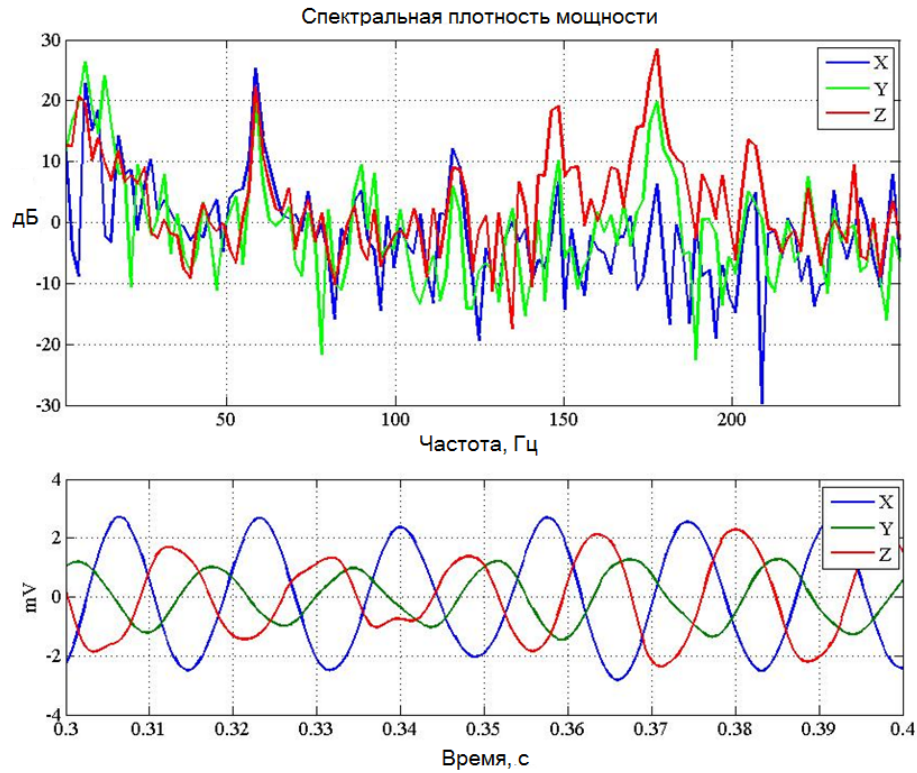


Рис. 4.16: Скважина «100м». Частота сигнала – 59 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 100 м; дистанция от источника до приемника – 100м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

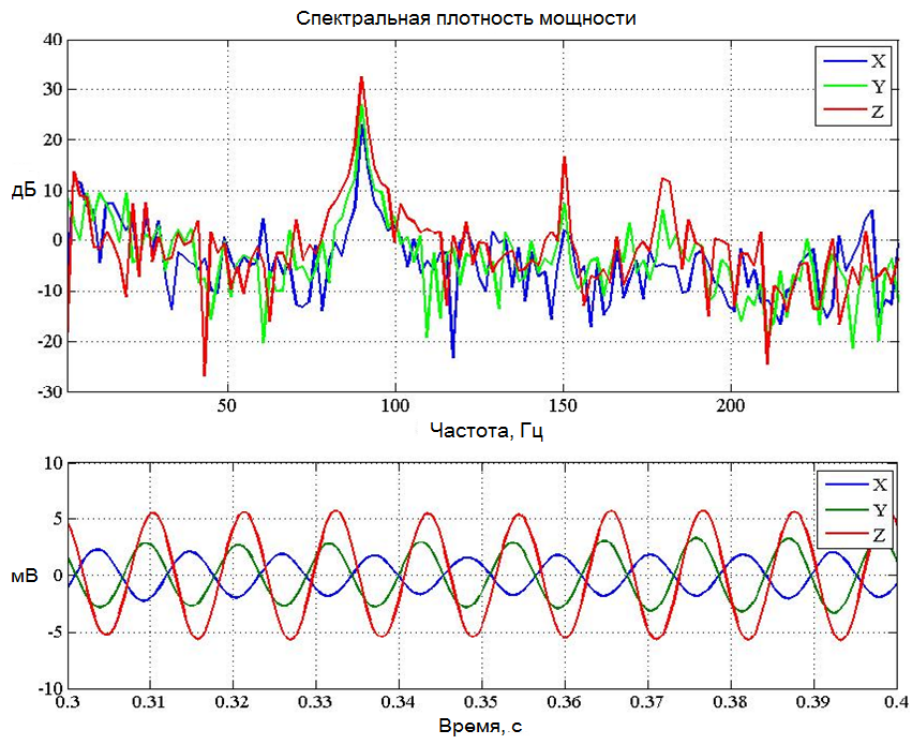


Рис. 4.17: Скважина «100м». Частота сигнала – 90 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 100 м; дистанция от источника до приемника – 100м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

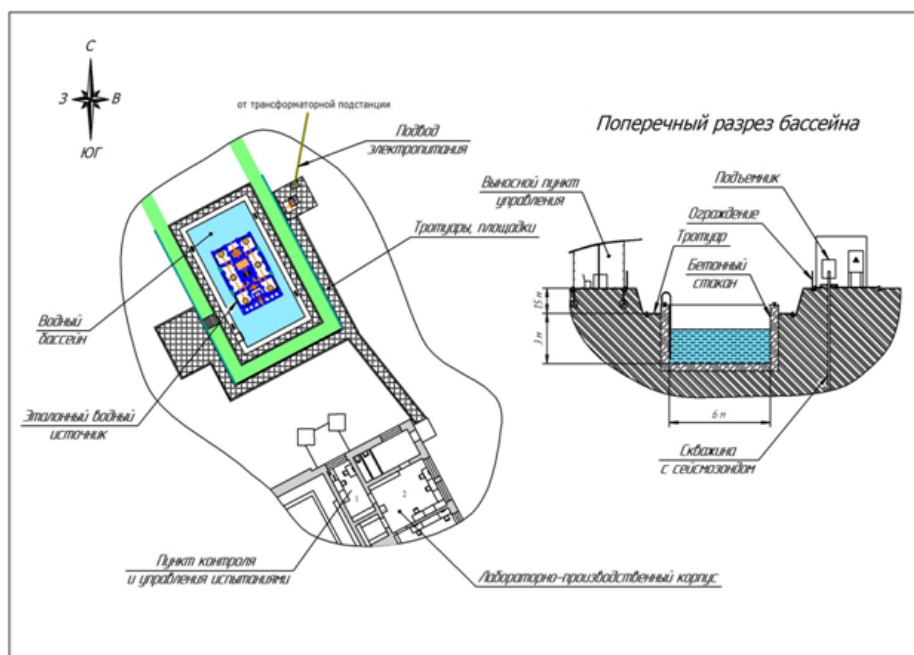


Рис. 4.18: Специализированный стенд испытаний водных источников

В состав стенда также входит заполненный бассейн с водой с бетонным основанием. Толщина стенки бассейна – 0,5 м. Следовательно, в данном случае моделируется ситуация, когда сейсмическая волна проходит через границу раздела «вода-бетон-почвенный слой», что дает возможность грубой прикидки потерь энергии сигнала на границе «горная порода – крепь».

Целью экспериментов с мощным эталонным импульсным источником являлась оценка потенциальных возможностей (запаса по мощности) сейсмического канала связи при использовании в шахтах, в случае если мощности малогабаритного вибрационного источника окажется недостаточно в привязке к конкретной производственной единице.

Результаты экспериментов с ВЭМ-50 на 100-метровой отметке сведены в таблицу 4.34, а также в виде спектральных характеристик представлены на рис. 4.20.

На 100-метровой отметке сигнал может быть детектирован, отношение сигнал/шум в этом случае составило на частотах 60 Гц и 90 Гц порядка 24 дБ 29 дБ соответственно (рис. 4.16 – 4.17). Также на глубине 100 метров зарегистрирован сигнал от водного источника ВЭМ-50 (рис. 4.20). Спектр сигнала имеет довольно широкую полосу, порядка $F=60$ Гц (от $F_{min}=20$ Гц до $F_{max}=80$ Гц). Амплитуда сигнала на выходе усилителя сейсмостанции составила $U \approx 200$ мВ.



Рис. 4.19: Специализированный стенд испытаний водных источников

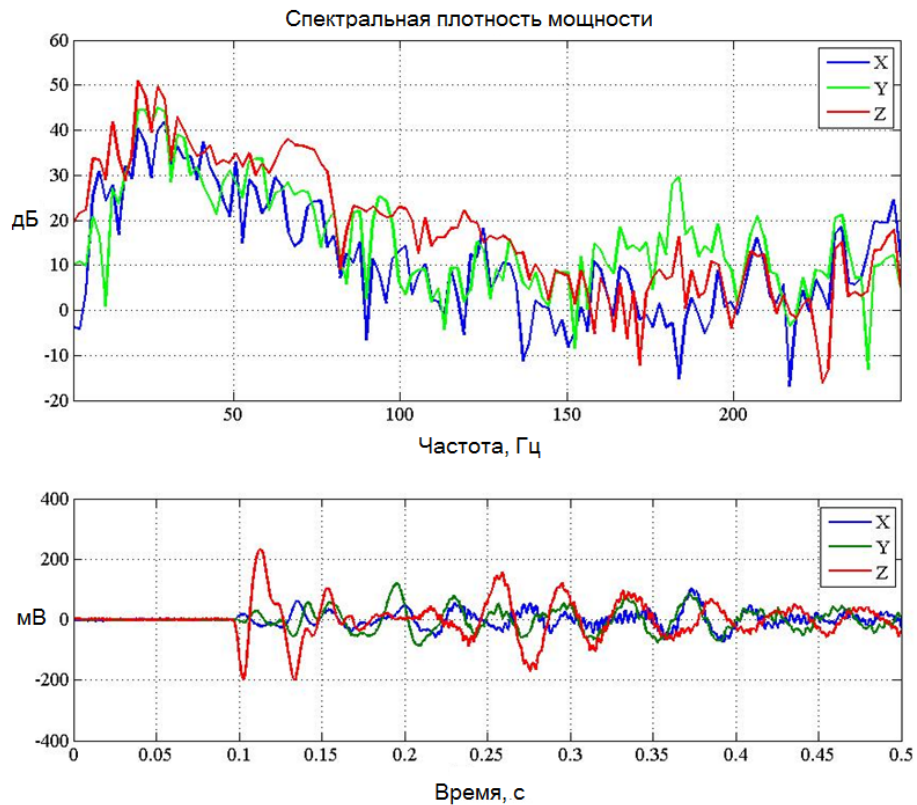


Рис. 4.20: Скважина «100 м». Источник ВЭМ-50. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 100 м; дистанция от источника до приемника – 100 м. $K_u = 2000$.



Рис. 4.21: Импульсный невзрывной сесмоисточник серии «Енисей» СЭМ-100. Сила воздействия на грунт $P=100$ тонн (1000 кН).

4.3.2 Результаты испытаний на скважине «300 м».

На скважине «300 м» исследования проводились в 3 контрольных точках: 71 м, 187 м, 290 м с помощью малогабаритного импульсного источника, входящего в состав аппаратуры экспериментального образца. Также проведены испытания при помощи импульсного невзрывного источника серии «Енисей» СЭМ-100 (рис. 4.21).

В отличие от испытаний, проведенных на 100-метровой скважине, скважина «300 м» расположена на расстоянии 70 м от сейсмоисточника. Следовательно, расстояние по глубине не совпадает с дальностью от источника до приемника (см. рис. 4.12).

Скважинный зонд по команде с телеметрической сейсмостанции закрепляется в точке на глубине 100 м.

Прием сигналов частотой 60 Гц и 90 Гц, а также сигналов с импульсного источника СЭМ-100 осуществляется через трос-кабель на инженерную сейсмостанцию SGD-SET (V3) с внутренним усилением 36 дБ и частотой дискретизации 4000 Гц.

Результаты измерений для гармонических сигналов на частотах 60 Гц и 90 Гц представлены в виде спектральных характеристик на рис.4.22 и рис.4.23 соответственно. Для мощного импульсного сейсмоисточника СЭМ-100 спектр сигнала на отметке 100 м показан на рис.4.24.

Во временной развертке сигналы на частотах 60 Гц и 90 Гц пропущены через фильтр Баттерворта 2-го порядка с полосой 20 Гц. Все данные экспериментов

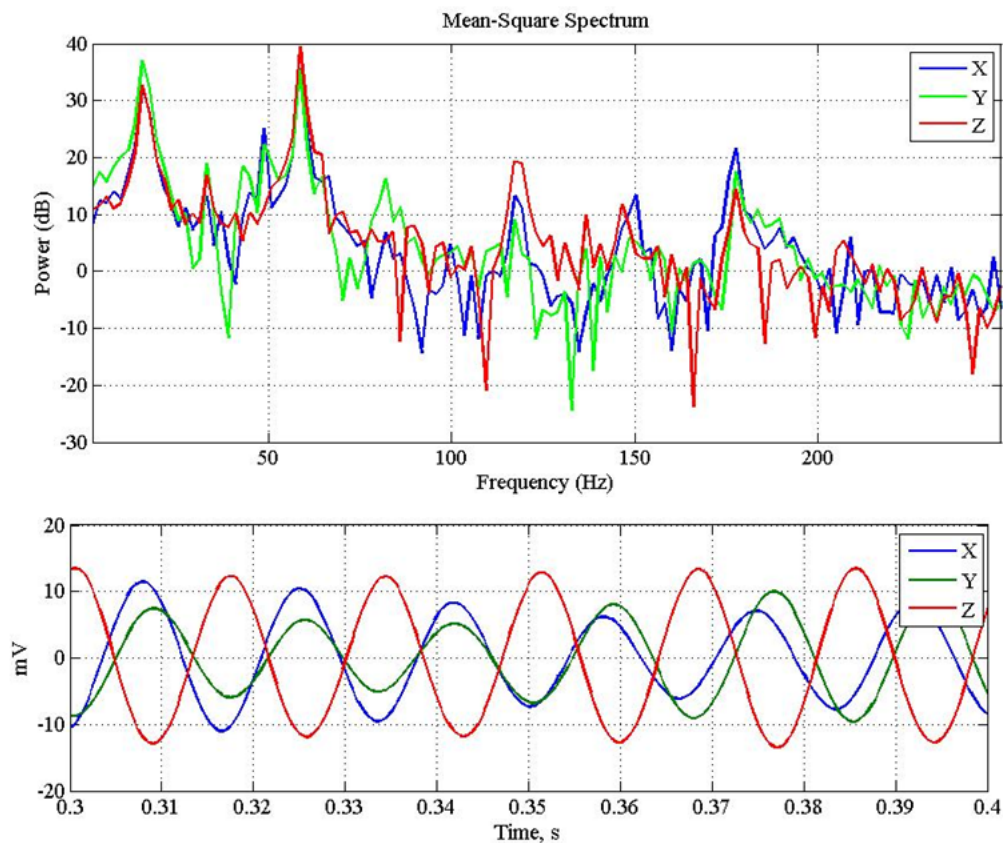


Рис. 4.22: Сквжина «300 м». Частота сигнала – 59 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 71 м; дистанция от источника до приемника – 100м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

сведены в таблицу 4.34.

Анализ спектральных характеристик сигналов позволяет сделать заключение о том, что сигналы с частотами 59 Гц и 90 Гц отчетливо присутствуют на дальности 100 м. Отношение сигнал/шум составляет не менее 27-30 дБ. Во временной области также отчетливо просматривается гармонический сигнал на частотах, задаваемых с пульта управления источником. Амплитуда сигнала на выходе фильтра Баттерворта составляет $U = 12-14$ мВ.

Также при расстоянии 100 метров выделен сигнал от импульсного невзрывного источника СЭМ-100 (рис. 4.24). Спектр сигнала имеет довольно широкую полосу, порядка $F=85$ Гц (от $F_{min} = 15$ Гц до $F_{max} = 100$ Гц). Амплитуда сигнала на выходе усилителя сейсмостанции составила $U = 1000$ мВ.

Каротажный зонд погружается на отметку глубиной 187 м, дальность до сейсмоисточника составляет, при этом 200 м. Прием сигналов осуществляется инженерной сейсмостанцией SGD-SET (V3) при включенном усилении 36 дБ. Результаты измерений для гармонических сигналов на частотах 60 Гц и 90 Гц представлены в виде спектральных характеристик на рис. 4.25-4.26. Для мощ-

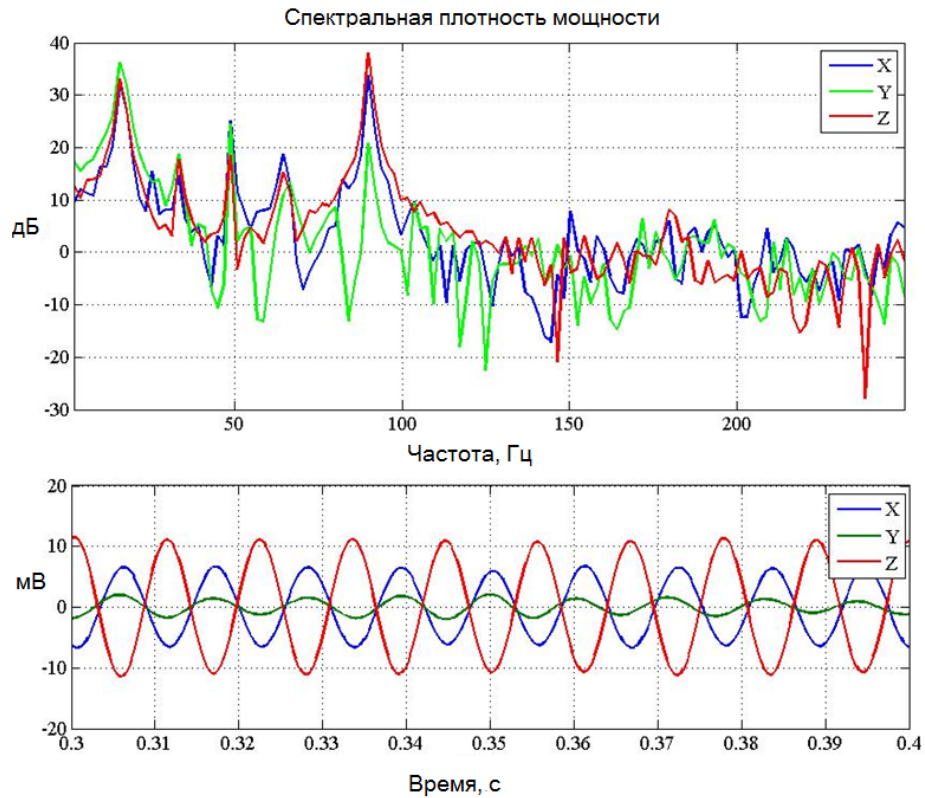


Рис. 4.23: Сквжина «300 м». Частота сигнала – 90 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 71 м; дистанция от источника до приемника – 100м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

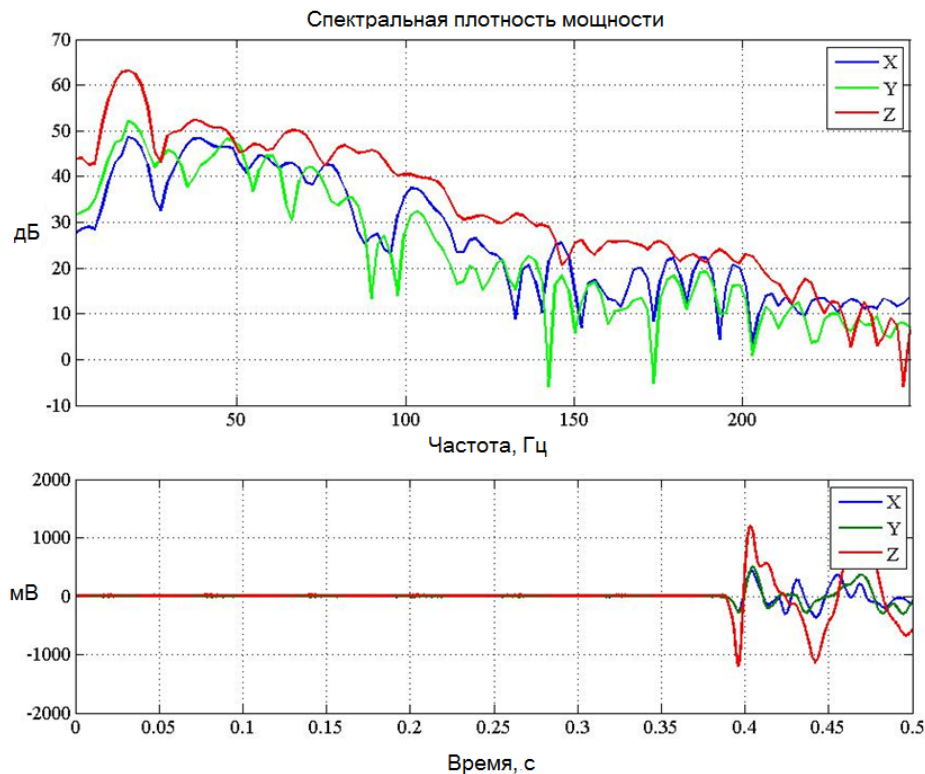


Рис. 4.24: Сквжина «300 м». Источник СЭМ-100. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 71 м; дистанция от источника до приемника – 100 м. $K_u = 2000$.

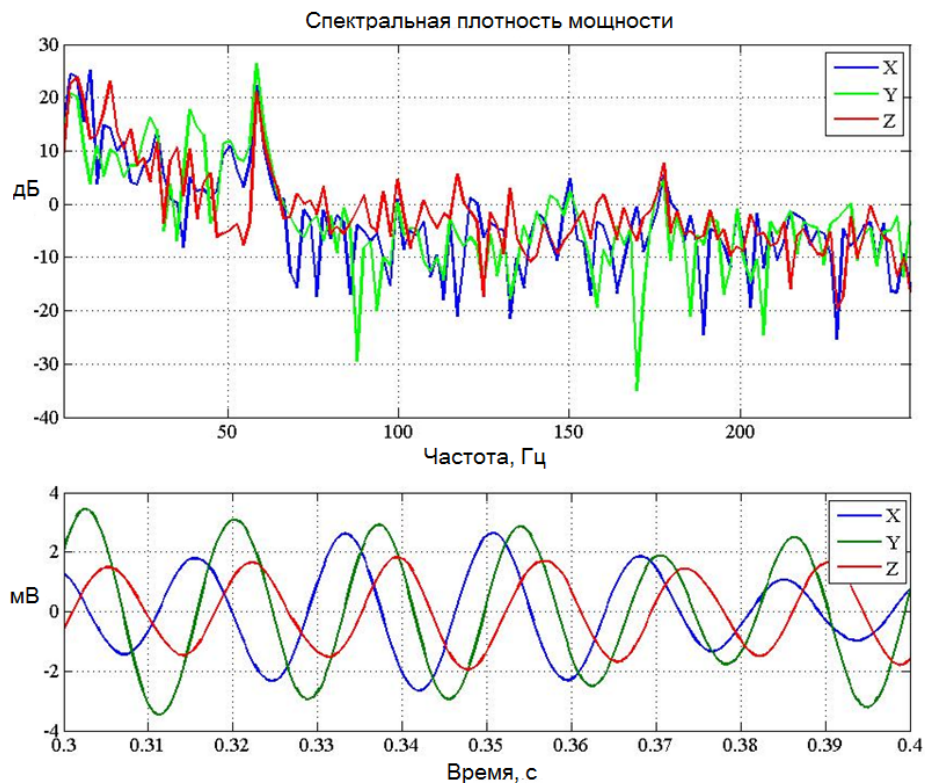


Рис. 4.25: Скважина «300 м». Частота сигнала – 59 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 187 м; дистанция от источника до приемника – 200 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

ного импульсного сейсмоисточника СЭМ-100 спектр сигнала на отметке 200 м показан на рис. 4.27.

Анализ спектральных характеристик сигналов позволяет сделать заключение о том, что сигналы с частотами 59 Гц и 90 Гц отчетливо присутствуют на глубине 187 м. Отношение сигнал/шум составляет не менее 22-25 дБ. Во временной области также отчетливо просматривается гармонический сигнал на частотах, задаваемых с пульта управления источником. Амплитуда сигнала на выходе полосового фильтра по Z-компоненте составляет порядка $U = 2$ мВ. На глубине 187 метров выделен сигнал от импульсного невзрывного источника СЭМ-100 (рис. 4.27). Спектр сигнала имеет довольно широкую полосу, порядка $\Delta F = 85$ Гц (от $F_{min} = 15$ Гц до $F_{max} = 100$ Гц). Амплитуда сигнала на выходе усилителя сейсмостанции составила $U = 400$ мВ.

Каротажный зонд погружается на отметку глубиной $h = 290$ м, дальность до сейсмоисточника составляет $R = 300$ м. Прием сигналов осуществляется инженерной сейсмостанцией SGD-SET (V3) при включенном усилении 36 дБ. Результаты измерений для гармонических сигналов на частотах 60 Гц и 90 Гц представлены в виде спектральных характеристик на рис. 4.28-4.29. Для мощного импульсного сейсмоисточника СЭМ-100 спектр сигнала на отметке 300 м

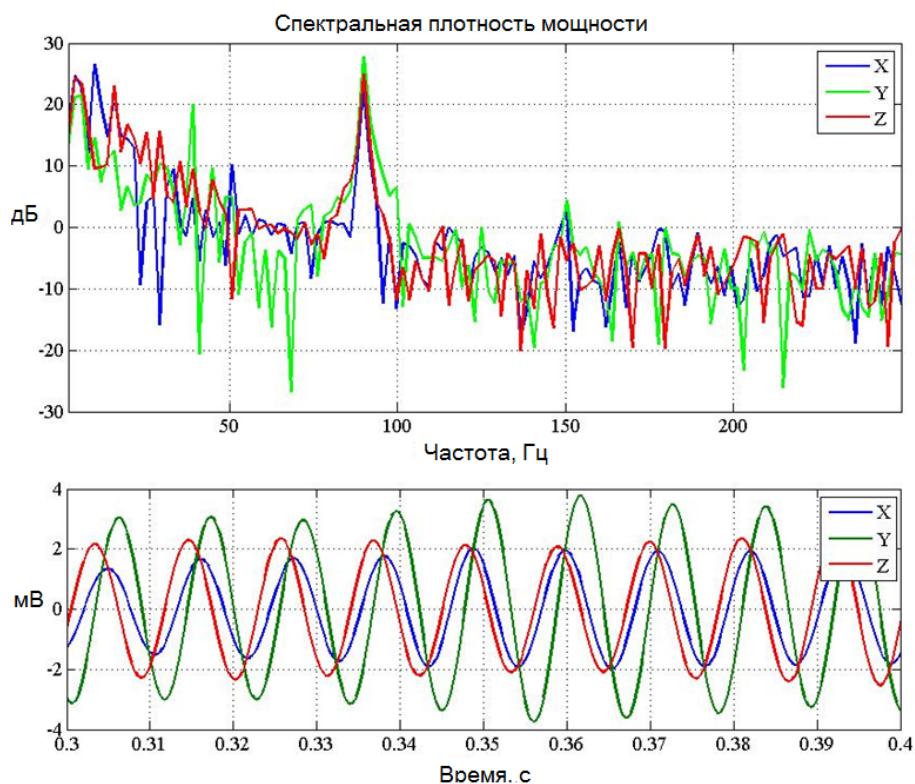


Рис. 4.26: Скважина «300 м». Частота сигнала – 90 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 187 м; дистанция от источника до приемника – 100 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

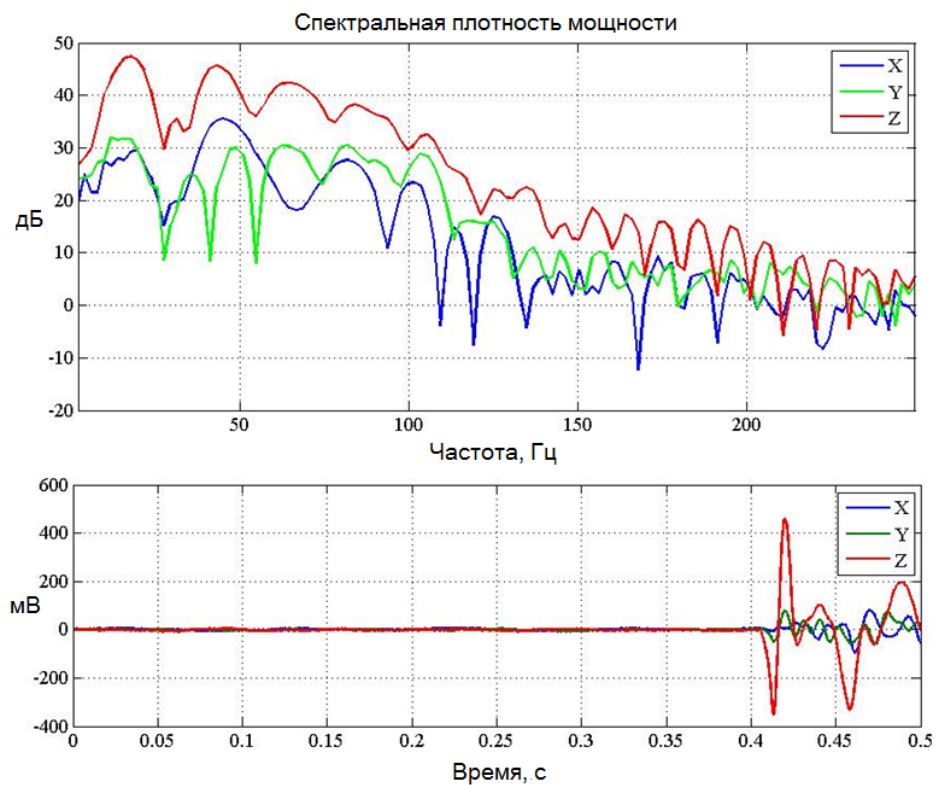


Рис. 4.27: Скважина «300 м». Источник СЭМ-100. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 187 м; дистанция от источника до приемника – 200 м. $K_u = 2000$.

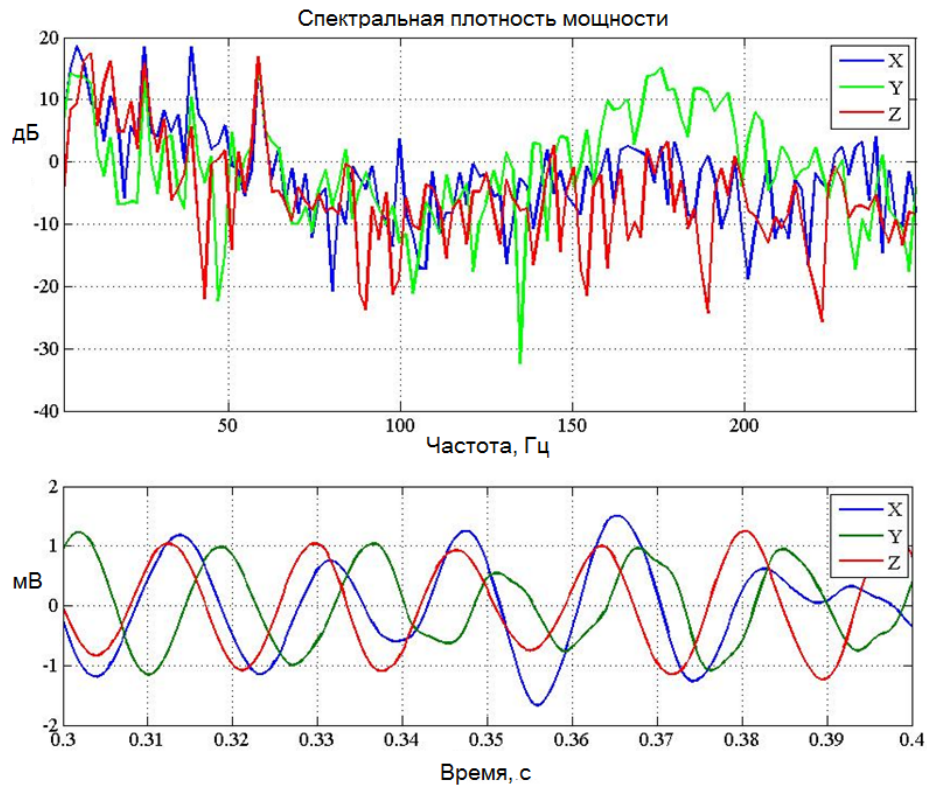


Рис. 4.28: Сквaziна «300 м». Частота сигнала – 59 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 290 м; дистанция от источника до приемника – 300 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

показан на рис. 4.30. Все данные экспериментов контрольной точке $h=290$ м сведены в таблицу 4.34.

Анализ спектральных характеристик сигналов позволяет сделать заключение о том, что сигналы с частотами 59 Гц и 90 Гц отчетливо присутствуют на глубине 290 м. Отношение сигнал/шум составляет порядка 18-25 дБ. Во временной области также отчетливо просматривается гармонический сигнал на частотах, задаваемых с пульта управления источником. Амплитуда сигнала на выходе полосового фильтра по Z-компоненте составляет порядка $U = 1$ мВ и $U = 2$ мВ для сигналов 59 Гц и 90 Гц соответственно.

Также на глубине 290 метров выделен сигнал от импульсного невзрывного источника СЭМ-100 (рис. 4.30). Спектр сигнала имеет довольно широкую полосу, порядка $\Delta F = 80$ Гц (от $F_{min} = 15$ Гц до $F_{max} = 95$ Гц). Амплитуда сигнала на выходе усилителя сейсмостанции составила $U = 250$ мВ.

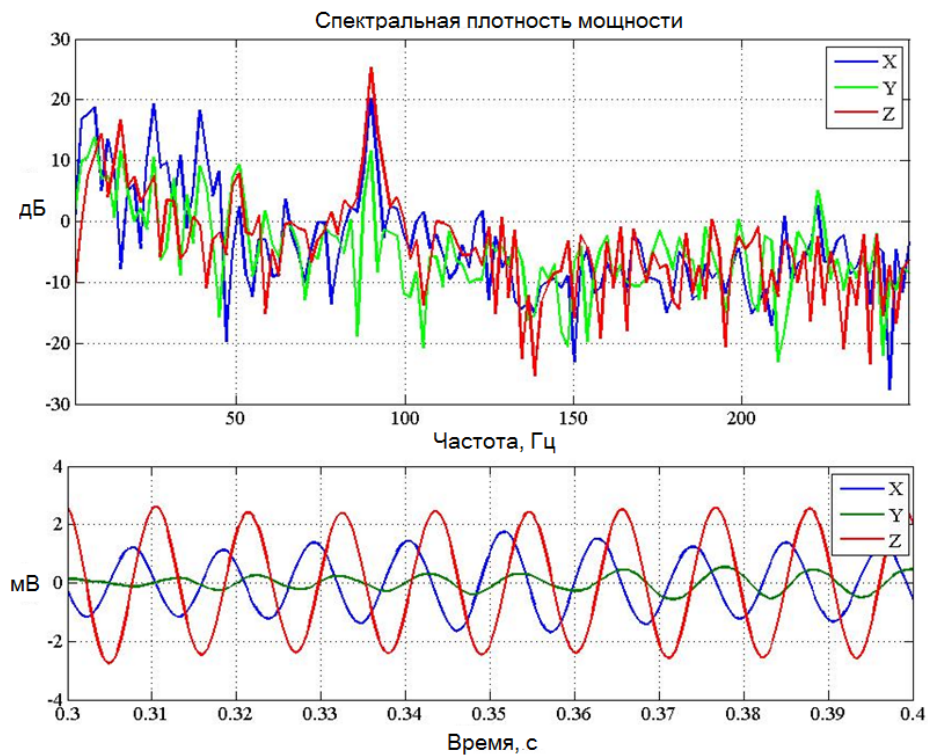


Рис. 4.29: Скважина «300 м». Частота сигнала – 90 Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения в точке глубиной 290 м; дистанция от источника до приемника – 300 м. $K_u = 2000$, время записи – 0,5 сек.

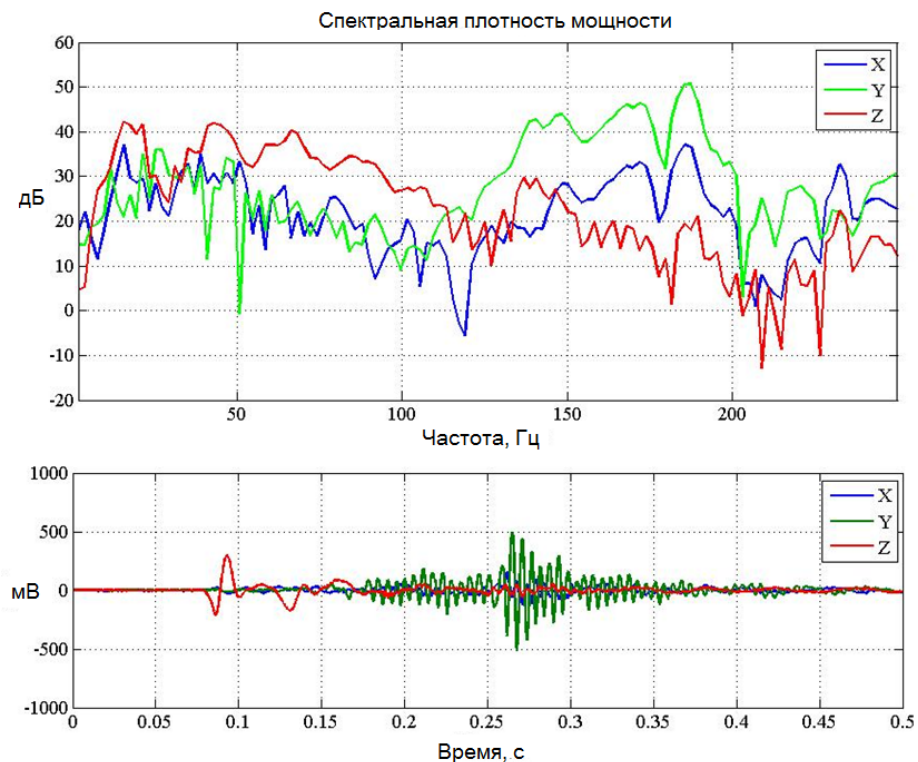


Рис. 4.30: Скважина «300 м». Источник СЭМ-100. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 290 м; расстояние от источника до приемника – 300 м. $K_u = 2000$.

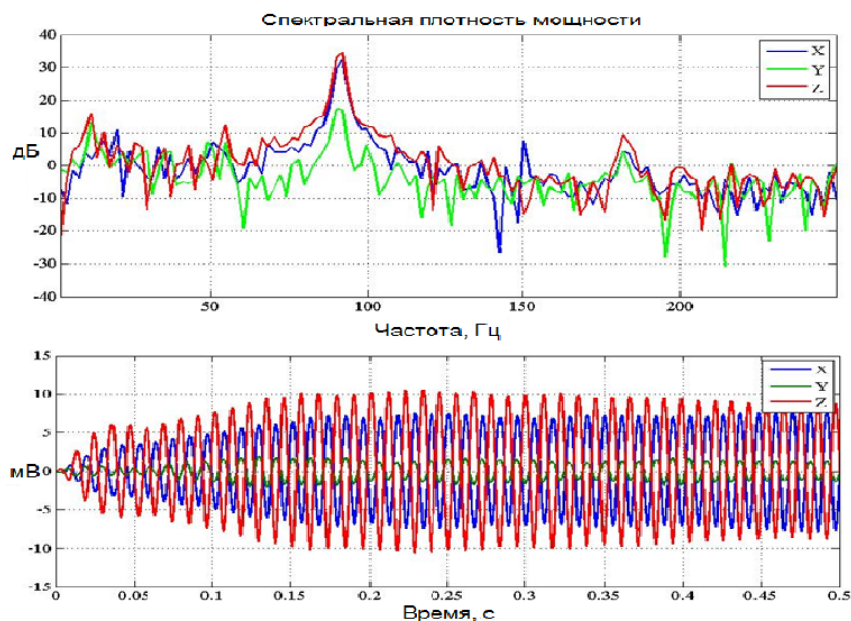


Рис. 4.31: Скважина «300 м». ЛЧМ-импульс с центральным значением несущей частоты $f_0=87$ Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 71 м; расстояние от источника до приемника – 100 м. $K_u = 2000$.

4.3.3 Результаты экспериментов по передаче сообщения на скважине «300 м».

Исследован режим передачи элементарного сообщения (1 бита информации) на разных глубинах (контрольные точки: 71 м, 187 м, 290 м). Бит информации передавался в виде ЛЧМ-импульса. Преимуществом передачи сообщений ЛЧМ-импульсом является возможность корреляционной свертки принятого сигнала в приемнике с его опорой в виде копии ЛЧМ-импульса. Сообщения детектируется при появлении корреляционного максимума (пика корреляционной функции). ЛЧМ-сигнал формировался сейсмоисточником в виде посылок длительностью $T=0.5$ сек. Диапазон частот – $\Delta F = (83-90)$ Гц. Спектральные характеристики сигнала и их временные реализации для дистанций 100м, 200м и 300м показаны на рис.4.31-4.33.

На рис.4.31-4.33 отчетливо видны максимумы в полосе свипирования сигнала : $\Delta F = (83-90)$ при центральной частоте 87 Гц. Данная картина соответствует параметрам излученных ЛЧМ-сигналов (по X, Y, Z-компонентам). Можно заключить, что на скважине «300 м» успешно осуществлена передача элементарного сообщения на дальность до $R = 300$ м.

Для полноты картины исследований распространения сейсмических волн, экспериментальные результаты, полученные на МнУИГЦ (табл. 4.34), необходимо дополнить данными по стратификации горных пород в месте проведения

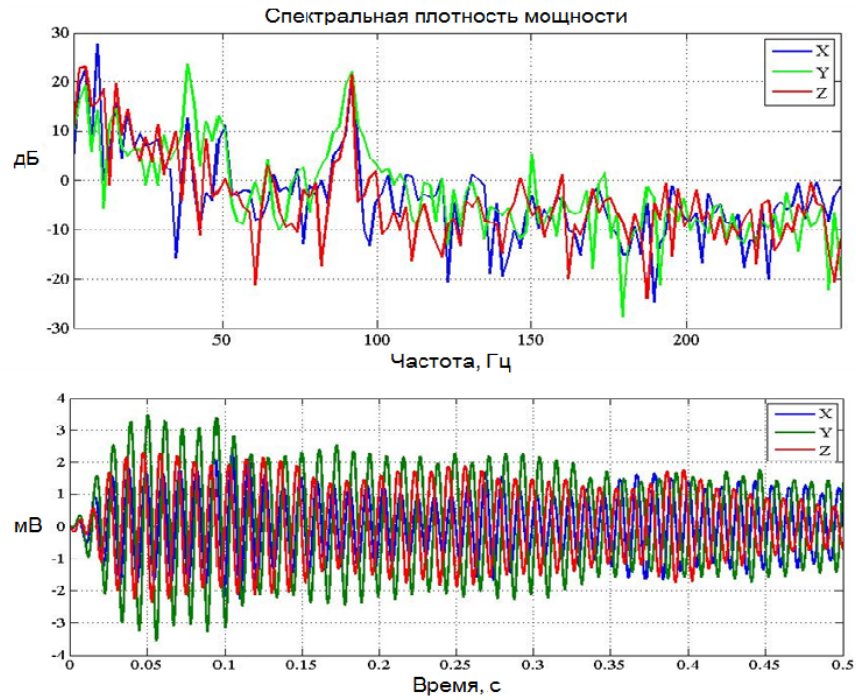


Рис. 4.32: Скважина «300 м». ЛЧМ-импульс с центральным значением несущей частоты $f_0=87$ Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 187 м; расстояние от источника до приемника – 200 м. $K_u = 2000$.

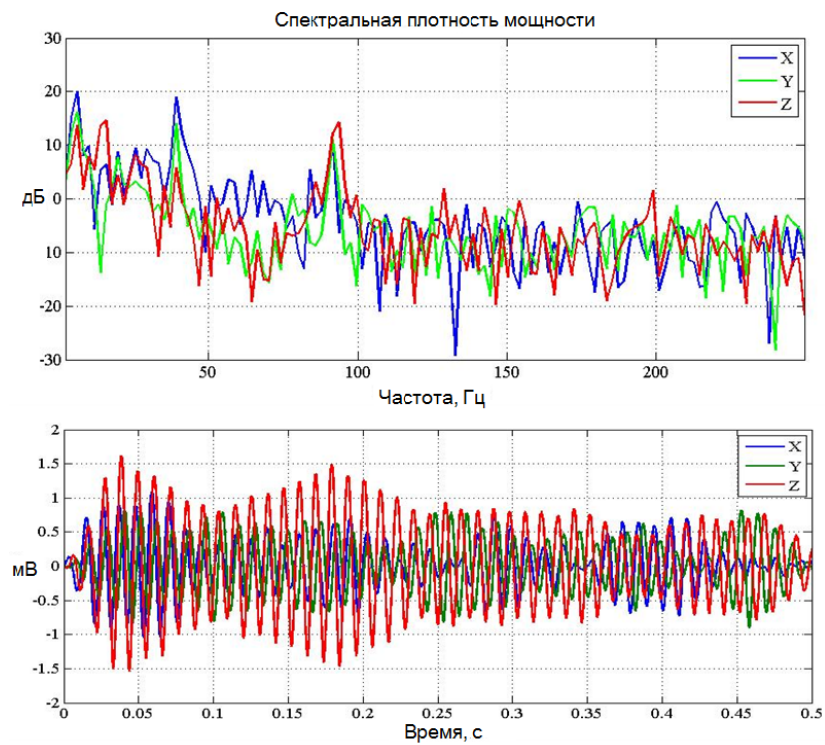


Рис. 4.33: Скважина «300 м». ЛЧМ-импульс с центральным значением несущей частоты $f_0 = 87$ Гц. Спектр сигнала – верхний рисунок, временная реализация – нижний рисунок. Измерения на отметке 290 м; расстояние от источника до приемника – 300 м. $K_u = 2000$.

		скважина 100		скважина 300		
Дистанция		50	100	100	200	300
Глубина		50	100	71	187	290
59 Гц	X (мВ/ дБ)	6 / 32	2.7 / 25.4	7 / 35.6	2 / 21.3	1.1 / 16.1
	Y (мВ/ дБ)	12 / 38.6	1.1 / 19.5	6.8 / 35.5	2.7 / 26.3	1.2 / 16.3
	Z (мВ/ дБ)	16 / 41.3	2 / 22.3	12.3 / 39.6	1.8 / 21.2	1.3 / 17
90 Гц	X (мВ/ дБ)	7 / 35	1.9 / 23	6.6 / 33.8	1.7 / 22.4	1.4 / 20.15
	Y (мВ/ дБ)	3.3 / 29.2	2.8 / 27.2	1.3 / 20.9	3.3 / 27.8	0.3 / 11.6
	Z (мВ/ дБ)	12.7 / 40.3	5.5 / 32.6	11.1 / 38.2	2.4 / 24.9	2.5 / 25.33
ВЭМ50	X (мВ/ дБ)		20 / 40			
	Y (мВ/ дБ)		25 / 44			
	Z (мВ/ дБ)		230 / 51			
СЭМ100	X (мВ/ дБ)			430 / 48.7	6.5 / 27	11 / 37
	Y (мВ/ дБ)			500 / 52	77 / 32	23 / 25
	Z (мВ/ дБ)			1200 / 63	460 / 47	297 / 42

Рис. 4.34: Таблица результатов испытаний.

испытаний. На рис. 4.35 представлен геолого-технический разрез геофизического полигона, полученный путем каротажа 300-метровой скважины.

Выводы

Проанализировав данные из табл. 4.34 в привязке к геологическому разрезу можно сделать следующие выводы по результатам экспериментальных работ на МнУИГЦ:

1) При исследовании процессов распространения сейсмического сигнала на 100-метровой скважине особенного внимания заслуживает тот факт, что при переходе с 50-метровой отметки на отметку 100 м, амплитуда сигнала падает на величину порядка 18-19 дБ, или в 8-9 раз. С точки зрения теории, волна от точечного источника имеет сферический фронт. Амплитуда колебаний грунта, в таком случае, спадает обратно пропорционально расстоянию от точки возбуждения. При перемещении измерительного скважинного зонда с отметки 50 м к уровню 100 м ослабление сигнала в идеальной, абсолютно упругой среде, должно составить 6 дБ (в 2 раза).

2) Аналогичная картина наблюдается при анализе распространения сигнала частотой 90 Гц. В этом случае потери на промежутке от «50 м» до «100 м» отметки составляют порядка 17-18 дБ. Таким образом, в породах 4 и 5 слоев геолого-технического разреза потери величиной 11-12 дБ обусловлены затуханием в породе и наличием границы.

3) Вывод, сделанный в п. 2 подтверждается при анализе данных (табл. 4.34), полученных на скважине «300 м». При переходе от уровня «71 м» на глубину

№ слоя	Глубина залегания пород, м		Мощность слоя, м	Описание пород	Категория пород по буримости	Разрез и конструкция скважины	Диаметр долота, мм	V, м/с
	от	до						
1	0	5	5	Песок плотный	II			500
2	5	15	10	Супесь со щебнем	III			600
3	15	30	15	Щебень выветрелых песчаников	IV		132	1000
4	30	70	40	Песчаник, чередующийся с алевролитом, аргиллитом, прослоями известняков	VI			2900
5	70	110	40	Песчаник трещиноватый на известкисто-кремнистом цементе	VIII			3600
6	110	300	190	Аргиллит	VI		112	4100

Рис. 4.35: Геолого-технический разрез скважины «300 м» на МнУИГЦ.

«187 м» потери сигнала на частотах 60 Гц и 90 Гц соответственно составили 17,5 дБ и 15 дБ. Данные результаты хорошо согласовываются с результатами, описанными для скважины «100». Т. е. при увеличении расстояния в 2 раза, сигнал упал на 15-17 дБ (6-7 раз). Разница в 2-3 дБ в сравнении с результатами, полученными на скважине «100» и «300» объясняются тем, что в первом случае на падение уровня сигнала влияла граница раздела между слоями №4 и №5, а во втором – между 5-м и 6-м слоями.

4) При переходе с отметки «200 м» на уровень «300 м» сигнал на частоте 60 Гц спадает на 4,2 дБ (1,7 раза), т. е. при увеличении расстояния в 1,5 раза амплитуда сигнала спадает не на 3,5 дБ, а на 4,2 дБ. Следовательно, согласно выражению (1) 0,7 дБ – это потери связанные с затуханием α . Из рис. 4.35 очевидно, что в данном случае отсутствуют потери на отражение, т.к. на промежутке «200 м» - «300 м» среда однородна и границы раздела отсутствуют.

5) Аналогичные выводы можно сделать из анализа данных, полученных с помощью импульсного источника СЭМ-100 с силой удара $P=1000$ кН. На дистанции «100-200 м» сигнал спадает на 16 дБ, что связано с граничными потерями, при переходе с 200-метровой на 300-метровую отметку потери составляют

5 дБ.

6) Особого внимание заслуживает факт возрастания уровня сигнала при переходе с отметки «200 м» на «300 м» на частоте 90 Гц (табл. 4.34). Измерения повторялись 5 раз. Наблюдаемый эффект можно объяснить наличием в точке «300 м» интерференционного максимума при данной длине волны, вызванного взаимодействием падающей и переотраженной волн.

7) Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что стратификация георазреза оказывает существенное влияние на уровень сигнала в точке приема.

8) С помощью импульсных невзрывных источников ВЭМ-50 и СЭМ-100 на МнУИГЦ были проверены потенциальные возможности импульсного метода передачи информации. На основе полученных с помощью ВЭМ-50 и СЭМ-100 экспериментальных данных можно заключить, что сигнал был выделен на глубинах 100 м, 200 м и 300 м. Отношение сигнал/шум, при этом, было в 100 раз выше, по сравнению с виброисточником, при в 1000 раз большей силе удара и длительности импульса – 5 мс. Кроме того, применение СЭМ -100 и ВЭМ-50 позволило получить импульсную характеристику разреза. Установлено, что среда ведет себя как фильтр низких частот с частотой среза 90 Гц.

9) С помощью малогабаритного источника осуществлена передача элементарного сообщения в виде ЛЧМ-импульса свипированием в диапазоне $F=(83-90)$ Гц. Длительность импульса $T=0,5$ с; скорость передачи информации $C=2$ бит/с.

10) Время непрерывной работы сейсмоисточника без потери качества в режиме передачи составило не менее $t=5$ часов без подзарядки аккумуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения безопасности работы в горных выработках при ограниченном пространстве пребывания персонала поставлена задача создания канала передачи аварийных сообщений на сейсмических волнах.

В результате проведенной серии теоретических и экспериментальных работ были получены важнейшие данные:

1. По характеристикам фонового шума в рудной и угольной шахтах.

Наличие мощных импульсных, а так же периодических помех, сосредоточенных в определенном частотном диапазоне, с одной стороны и окон прозрачности с другой, обуславливает использование передатчика в узкополосном режиме.

2. Созданный экспериментальный образец сейсмического канала аварийной сигнализации и связи, выдержал испытания по всем пунктам программы и методики испытаний и удовлетворяет всем заявленным требованиям технического задания, в частности: - дальности действия – не менее 1000 м; - скорости передачи – не менее 0.1 бит/сек; - потребляемая мощности – не более 2 кВт;

Было предложено использование короткоходного полиуретанового амортизатора для возбуждения, при помощи электромагнитного двигателя, гармонического сигнала. Данное решение может быть использовано при проектировании наземных электромагнитных сейсмоисточников для задач геофизики в области поиска углеводородов и других систем с электромагнитным линейным приводом.

Разработанный источник тока для заряда емкостного накопителя энергии подтвердил расчетные характеристики, при работе в различных режимах, в т.ч. при использовании различных методов сокращения времени заряда и повышения КПД.

3. Теоретически и экспериментально обоснована возможность создания канала сейсмической аварийной шахтной связи на дальность 1000 метров при существующей энергетике системы. Однако задача организации канала связи не имеет однозначного решения для всех типов шахт. Поэтому система связи должна быть адаптивной, чтобы обеспечивать возможность настройки аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации.

Управляемыми параметрами являются время передачи, рабочая частота несущей сейсмического канала, а так же использование расширенной сети сейсмоприемников.



Рис. 4.36: Фотография передатчика сейсмической системы связи АСС1.

4. По результатам проведенных исследований можно заключить, что данная технология имеет под собой серьезную научно-техническую основу и обладает существенными перспективами, чтобы занять рыночную нишу в области создания беспроводного обратного канала аварийной сигнализации и связи в шахтах.

5. На основе результатов испытаний показана возможность создания опытного образца с перспективой его сертификации для угольных шахт, разработано ТЗ на серийный образец.

ст

ЛИТЕРАТУРА

Литература

- [1] Bandyopadhyay L. K., Chaulya S. K., Mishra P. K. Wireless Communication in Underground Mines / RFID-Based Sensor Networking. – 2010.
- [2] Радиосвязь под землей. Проблемы и пути решения» [Электронный ресурс]. www.mining-media.ru/ru/article/newtech/1429-radiosvyaz-pod-zemlej-problemy-i-puti-resheniya.
- [3] Капаев А. В., Котова А. Е. Радиосвязь под землей. Проблемы и пути решения /Горная промышленность. – 2004. – №. 1. – С. 49-52.
- [4] Подземная система радиосвязи: пат. 103044 Рос. Федерация/Никитин В. В., Мошин С. И., Мааров С. И., Бузинов А. А., Акульшин П. В. - опубл. 20.03. 2011.
- [5] Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Y.V. and other Autonomous Underwater Robots. // Systems and Technology. M.: Science, 2005. 400 s.
- [6] Kasatkin B.A., Matvienko Y.V., Zlobina N.V, Rylov R.N. Design principles of sonar systems nautical long range // Proc.of Intern. Conf. SubSeaTech'2007. June/ 25-28. St.Petersburg, 2007.
- [7] Криволапов Г.И., Криволапов Т.Г., Малашенко А.Е. Способ определения дистанции в гидроакустической сети: пат. 2248586 Рос. Федерации, МПК G01S 15/80, №2003119994/09; заявл. 01.07.2003; опубл. 20.03. 2005. Бюл. №8.
- [8] Малашенко А.Е., Перунов В.В. Глубоководные донные автономные станции в радиогидрофизических комплексах мониторинга акваторий.//Подводные исследования и робототехника.- 2010, №1(9). – С. 53-57.
- [9] Кубрин С. С., Тимофеев В. В., Блохин Д. И. - опубл. 20.02.2010.
- [10] Squire J. et al. System for communicating location of survivors in mine emergencies : пат. 7843768 США. – 2010.

- [11] La Magna J., Squire J. Seismic Through-Rock Communication – an Alternative to Electrical Methods //THROUGH-ROCK COMMUNICATION, BCRA CAVE RADIO & ELECTRONICS GROUP, JOURNAL 86, JUNE 2014. – С. 3-6.
- [12] Squire J. C. et al. Underground Engineering //Potentials, IEEE. – 2014. – Т. 33. – №. 4. – С. 20-23.
- [13] Squire J. C. et al. Proof-of-concept testing of a deep seismic communication device //Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. – 2009. – Т. 326. – С. 97-100.
- [14] Farstad, A.J., Fisher, C., Linfield, R.F., Maes, R.O., and Lindeman, B. Trapped Miner Location and Communication System Development Program, US Bureau of Mines, OFR 41(1), 74 pp.
- [15] Vaseghi, S.V., Advanced digital processing and noise reduction, 3th edition: John Wiley & Sons, -2006.
- [16] Heidi Vella, Wireless communication systems give mining rescuers eyes and ears below the earth, Kable Intelligence Limited, -2014. [Электронный ресурс]. <http://www.mining-technology.com>
- [17] Reagor D., Vasquez-Dominguez J. Through-the-earth radio : пат. 7149472 США. – 2006.
- [18] Хмелевской В. К., Горбачев Ю. И., Калинин А. В., Геофизические методы исследований. Петропавловск-Камчатский: изд-во КГТУ, 2004, 232с.
- [19] Бондарев В. И. Сейсморазведка. – Екатеринбург: Изд. УГГА, 2007. – 690 с.
- [20] Викторов А. И. Поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
- [21] Прохоров А. М. Физическая энциклопедия. – Рипол Классик, 1988.
- [22] Chapman, С.Н., 2004, Fundamentals of Seismic Wave Propagation, Cambridge University Press, 532 pp.
- [23] White, J.E., 2000, Seismic Wave Propagation: Collected Works of J.E. White, Society of Exploration Geophysicists, 382 pp.

- [24] Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., и др. Дистанционный метод поиска минно-взрывных заграждений и мин в любых корпусах на основе параметрического взаимодействия электромагнитных и акустических волн // Специальная техника. – 2013. - №5. - С. 9-13.
- [25] Гошин Г. Г. Устройства СФЧ и антенны. Часть вторая. – Томск: -2003.
- [26] Gerard Schuster. Seismic Telemetry and Communications System : пат. US 20110310701 A1 США. – 2011.
- [27] Ю.П.Кострыгин, Д.А.Колесников, Оценка влияния амплитудной неидентичности импульсов в развертках на эффективность кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний. – 2011.
- [28] М.Б.Шнеерсон, А.М.Лунгин и др., Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник под редакцией Шнеерсона// М.: Недра.-1992, 240 с.
- [29] В.И. Костин и др., Конечно-разностный метод численного моделирования распространения сейсмических волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах //Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т. 12. – С. 85-93.
- [30] С.П. Мостовой, Исследование ближнего поля импульсного сейсмического излучателя с преобразователем индукционно-динамического типа// Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – Т. №29. – С. 114-119.
- [31] А.В.Детков, В.В.Слабко, Г.Я.Шайдуров и др. О возможности создания роторного источника сейсмических поперечных волн с электромагнитным возбуждением //Журнал Сибирского Федерального Университета. СЕРИЯ: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ. – 2013. – Т.6. – №1.
- [32] J. J. Spilker, GPS Signal Structure and Performance Characteristics, Global Positioning System, Volume I, The Institute of Navigation, 1980.
- [33] R. G. Lyons , Understanding the 'Phasing Method' of a Single Side Band Demodulation, <http://www.dsprelated.com//blogs-1>, -2012.
- [34] М.К.Белкин (ред.), Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств// Киев: Выща школа. -1988.
- [35] R. G. Lyons , Understanding digital signal processing, *Pearson Education*, - 2010.

- [36] Никитин Г. И. Применение функций Уолша в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов: Учеб. пособие/СПбГУАП. СПб. 2003. 86 с.
- [37] Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – Радио и связь, 1985.
- [38] Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970.
- [39] Бородин Л.Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. — М.:Сов. радио, 1968.
- [40] Ляшенко С. Н., Оськин Н. Н. Оценка помехозащищенности цифровых систем связи при использовании двоичных кодов на основе последовательностей Уолша //Вестник Воронежского института МВД России. – 2011. – №. 4.
- [41] Pratt W. K. Digital image processing, 1991 //Publisher John Wiley & Sons.
- [42] Линник М.А., Карабанов И.В., Бурдинский И.Н., Миронов А.С. Компьютерная модель гидроакустической телекоммуникационной системы в среде MATLAB // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: Материалы V Междунар. науч. конф.– Харьков: ФЛП Е.В. Шейнина, 2011. – С. 447-452.
- [43] Massimiliano Fatica, Won-Ki Jeong Accelerating MATLAB with CUDA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.5600&rep=rep1&type=pdf>
- [44] Болюх В. Ф., Олексенко С. В., Щукин И. С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя //Электротехника и электромеханика. – 2012. – №. 6.
- [45] Болюх В. Ф., Олексенко С. В. Синтез параметров индукционно-динамического двигателя //Вісник Національного технічного університету. – 2013. – №. 15. – С. 93-104.
- [46] Shchitnikov A.A. Determination of Mechanical Force between two Planar Inductors in the Problem of Electrodynamical Excitation of Seismic Waves: Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics – 2014.
- [47] А.И.Слободянюк. Физика// Мн.: БГУ.-2001, 171 с.

- [48] Shaidurov G.Y., Kudinov D.S., Shchitnikov A.A. Pulsed Non-Explosive Seismic Sources With An Electromagnetic Drive: International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 15 (2015) pp 35907-35913
- [49] Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян. Теоретические основы электротехники. Т.2. Л.: Энергоиздат.-1981. 540 с.
- [50] D.W.Knight. An introduction to the art of Solenoid Inductance Calculation With emphasis on radio-frequency application. ([http : //www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/part1.html](http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/part1.html))
- [51] R.G.Medhurst. HF resistance and self-capacitance of single-layer solenoids //Wireless Engineer. – 1947. – Т. 24.
- [52] Ю.Н.Сохор. Моделирование устройств в пакете LTSpice/SwCAD//Псков:ППИ,-2008,165 с.
- [53] Котельников И. А., Черкасский В. С. Скин-эффект в задачах.//Новосибирск,-2013,79 с.
- [54] Шайдуров Г.Я., Воронцов Ю.С., Кудинов Д.С., Щитников А.А. Радиолокационный метод обнаружения миноподобных объектов с использованием сейсмических ударов. Ч.1: Специальная техника. №6 - 2013.
- [55] Шайдуров Г.Я., Воронцов Ю.С., Кудинов Д.С., Щитников А.А. Радиолокационный метод обнаружения миноподобных объектов с использованием сейсмических ударов. Ч.2: Специальная техника. №1 - 2014.
- [56] Детков В.А. Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками: Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics – 2009.
- [57] Детков В.А. Повышение эффективности управления импульсными невзрывными источниками "Енисей"при сейсморазведочных работах: Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics – 2010.
- [58] Ивашин В. В., Кудинов А. К., Певчев В. П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий //Физическая реализация характеристик реактивных двухполюсников. – 2012. – С. 6.

- [59] Певчев В. П. Плотность тока в обмотке импульсного электромагнитного двигателя // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – Т. 1. – №. 2. – С. 26-29.
- [60] Скворцов В., Русанов В., Матвеев К. Устройство заряда на базе одноктных комбинированных преобразователей напряжения / Скворцов В. // Силовая электроника. - изд. ООО «Медиа КиТ». - Санкт-Петербург, 2012. -1. -С. 74-75.
- [61] Технический регламент о безопасности низковольтного оборудования. Федеральный закон от 27 декабря 2009 г. N 347-ФЗ
- [62] Пентегов Е.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. -Киев: Наукова думка, 1982.- 406 с.
- [63] Булатов О.Г. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. - М.: Радио и связь, 1986. -160 с.
- [64] Кныш В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. -Л: Энергоатомиздат, 1981. -160 с.
- [65] Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Степанов Е.Ю. Инверторный источник питания для заряда емкостного накопителя / Буркин Е.Ю. // Известия Томского политехнического университета. - изд. ТПУ. - Томск, 2012. - 4. -С. 155-160.
- [66] Воронцов Ю.С., Кузьмин, Д.С., Фомин Д.С. Шайдуров Г.Я. Система аккумуляторного электропитания импульсных невзрывных сейсмических источников «Енисей» / Ю.С. Воронцов, Кузьмин Д.С. // Приборы и системы разведочной геофизики. - изд. «ИнформГеофизСервис». - Саратов, 2012. - 2. -С. 35-36.
- [67] Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника //М.: Техносфера. – 2005. – Т. 3.
- [68] Гусев Б., Овчинников Д. Мостовой преобразователь с удвоителем тока при подмагничивании сердечника трансформатора //М.: Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – Вып. 5.
- [69] Мощенок В.И. Современная классификация методов определения твердости //Харьков.: Автомобильный транспорт. – 2010. – №26.

- [70] Horowitz P., Hill W., Hayes T. C. The art of electronics. – Cambridge : Cambridge university press, 1989. – Т. 2. – С. 658.
- [71] Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров //Москва: – Litres, 2014.
- [72] Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Справочная книга // Ленинград: -Энергоатомиздат, 1986.
- [73] Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
- [74] Кудинов Д.С., Щитников А.А. Сейсмический канал связи. Сборник материалов Международной военно-научной конференции «Проблемы создания и перспективы развития Единой (Объединенной) системы противовоздушной и противоракетной обороны ОДКБ» .-Тверь. – 2015. – №8. – С. 4.
- [75] Гарманов А. В. Практика оптимизации соотношения сигнал/помеха при подключении АЦП в реальных условиях: М. – 2010.
- [76] Гарманов А. В. Требования к источникам сигналов АЦП с входным динамическим коммутатором каналов в многоканальном режиме–АЦП L-154, L-761, L-780, L-783, L-791, E14-440, E14-140, H-11, LC-111, LTR11: М.-2009
- [77] Артемьев В.А, Щитников А.А. Кудинов Д.С., Королькова Е.Б. Сейсмическая шахтная связь как альтернатива радиосвязи. Сборник тезисов. - Красноярск. -С. 410-413.
- [78] Шайдуров Г.Я., Романова Г.Н., Щитников А.А., Кохонькова Е.А. Перспективность применения сейсмических сигналов в аварийной шахтной связи. «Известия вузов. Горный журнал» – 2015. – №5. – С. 1-7.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДУЛЬ ВИБРАЦИОННЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ

- Группа – I рудничное взрывозащитное электроборудование; предназначенное для применения в подземных выработках шахт, рудников и в их наземных строениях, опасных по рудничному газу. **РВExdIIaI X/ProExstail X** (сособорудованное оборудование).
- Вынутренний объем камеры изделия – 13 179 см³.
– 6258 см³ – Корпус АСС1103.00.000.00;
– 6921 см³ – Крышка модуля АСС1100.000.00.
- Суммарный объем вынутренних камерной камеры – 4870 см³.
- Наименьшее значение длины взрывозащитной щели до отверстия (l) определяется геометрическими параметрами Крышки модуля АСС1100.000.00 и составляет 19 мм при общей длине щели L=38,5 мм, определенной по общим геометрическим параметрам стержня Корпуса АСС1103.00.000.00 и Крышки модуля АСС1100.000.00.

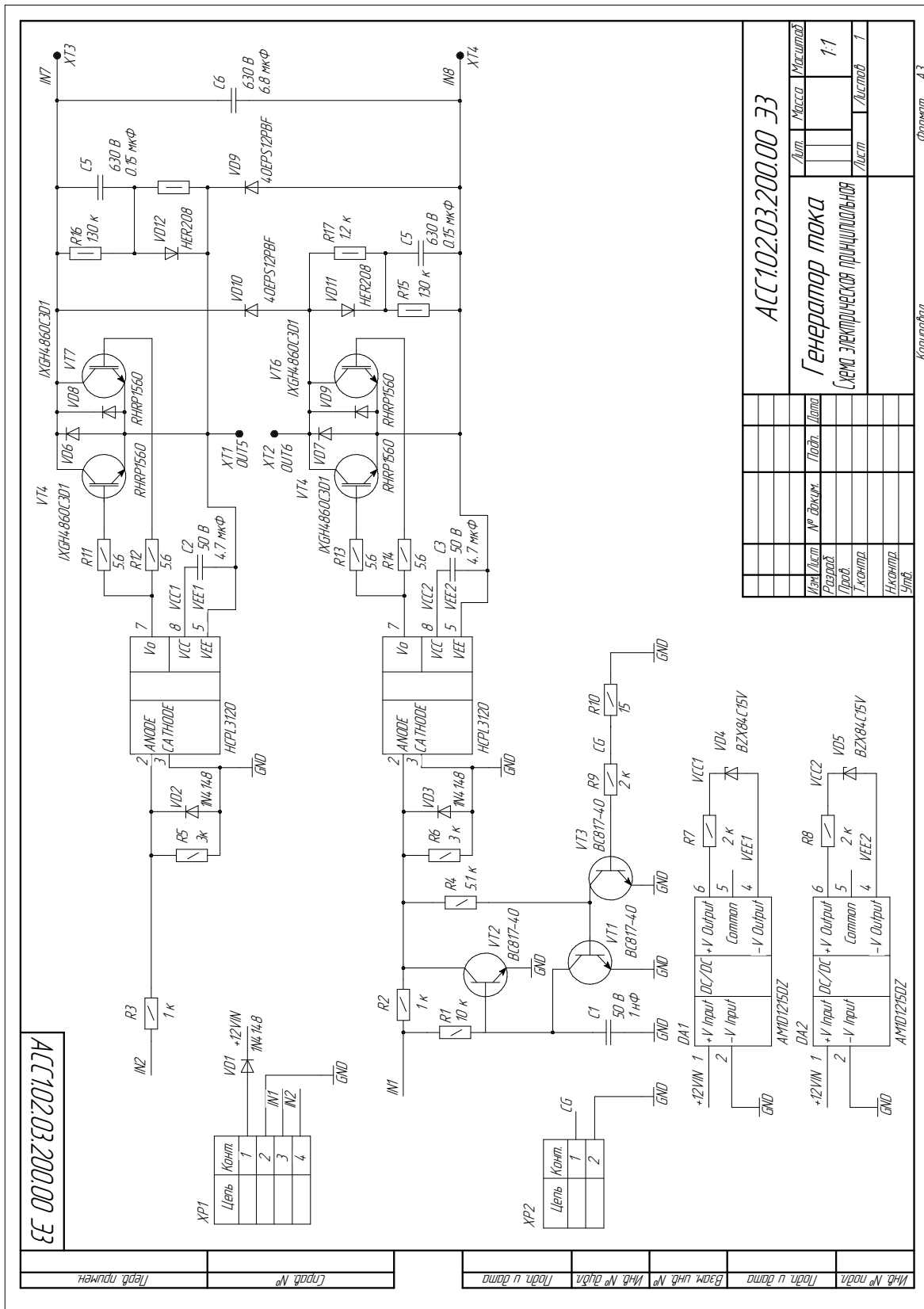
ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

- *Размеры для справок
- Магнитный зазор электромагнита $\delta_{\text{мг}}=6$ мм установить с помощью набора прокладок поз. 8-9 10. При этом толщину набора прокладок определять по формуле $S_{\text{пр}}=10_{\text{мг}}-H_{\text{мг}}+0,2$ мм ($S_{\text{пр.макс}}=3$ мм в следующем порядке:
– индуктор установить в корпус на инструментальной пластину АСС103.00.000.051, установленную взамен прокладки поз. 11;
– определить размер Н – от поверхности магнитопровода индуктора до поверхности поверхности корпуса с точностью до второго знака после запятой ($H_{\text{макс}}=3$ мм);
– вычислить толщину набора прокладок по приведенной формуле и записать в паспорт изделия размеры Н и $S_{\text{пр}}$.

Исполн.	Коллектив	Корректор	Лист	Масса	Масштаб
Сверст.	Сверст.	Сверст.	105	12,5	1:1
Провер.	Провер.	Провер.	Листов	Листов	Листов
Контр.	Контр.	Контр.	2	2	2

АСС103.00.000.00 СБ					
Модуль вибрационный					
(Сборочный чертеж)					

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЕНЕРАТОР ТОКА



ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



НАУЧНО-ВНЕДРЕНЧЕСКИЙ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР «РАДИУС»
(АО НВИЦ «РАДИУС»)

660115, г. Красноярск, ул. Попова, 1
тел. (391) 299-80-00, 299-80-01,
235-00-00, факс (391) 299-80-12
e-mail: info@radius-nvic.ru, www.radius-nvic.ru

УТВЕРЖДАЮ:



Директор АО НВИЦ «Радиус»

А. В. Кочнев

2015 г.

М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования

Задача передачи сигналов через горную породу для повышения безопасности в подземных рудниках и угольных шахтах является чрезвычайно актуальной. На сегодняшний день в мировой практике горноспасательных работ не существует адекватных технологических решений, удовлетворяющих правилам безопасности в угольных шахтах по передаче аварийных сигналов на расстояния до 1000 м в направлении «горная выработка – поверхность».

Настоящий акт составлен о том, что результаты исследований Щитникова Александра Александровича по теме: «Разработка сейсмического канала передачи сообщений в горных выработках» внедрены в практику работ АО НВИЦ «Радиус».

Ведущий инженер
АО НВИЦ «Радиус»

С.Н. Дегилевич



Юридический/почтовый адрес: 660074 г. Красноярск, ул. Ленинградская 66, ИНН 8803001246, КПП 246301001, расчетный счет 40702810000340000735, филиал «Газпромбанк» (ОАО) г. Красноярск, БИК 040407877, корсчет 30101810100000000877, ОКПО-49694178, ОКОГУ-49014, ОКТМО-04701000, ОКАТО-04401371000, ОКВЭД-74.20.2, ОКФС-65, ОГРН-1028800002846, Тел/факс (391) 298 56 75, e-mail: common@e-geo.ru

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
ООО «Эвенкиягеофизика»


В. А. Детков
« » 20 г.
М.П. 

**Акт внедрения
результатов диссертационного исследования**

Одна из основных проблем поиска нефти и газа заключается в трудностях при прохождении сложного рельефа горно-таежной местности тяжелой вибрационной или импульсной сейсмоизлучающей техникой.

В этих условиях чрезвычайно важно использование новых методов возбуждения и регистрации сейсмических сигналов. Перспективным будет являться применение принципиально нового подхода с использованием малогабаритных кодо-импульсных источников сейсмических волн.

Настоящим актом подтверждаем, что в практику работ ООО «Эвенкиягеофизика» внедрены результаты исследования Щитникова Александра Александровича на тему: «Разработка сейсмического канала передачи сообщений в горных выработках».

Главный геофизик  Струнов А.В.



Входит в группу IGSS

ООО «Эвенкиягеофизика»

Юридический/почтовый адрес: 660074 г. Красноярск, ул. Ленинградская 66, ИНН 8803001246, КПП 246301001, расчетный счет 40702810000340000735, филиал «Газпромбанк» (ОАО) г. Красноярск, БИК 040407877, корсчет 30101810100000000877, ОКПО-49694178, ОКОГУ-49014, ОКТМО-04701000, ОКАТО-04401371000, ОКВЭД-74.20.2, ОКФС-65, ОГРН-1028800002846, Тел/факс (391) 298 56 75, e-mail: common@e-geo.ru

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
ООО «Эвенкиягеофизика»


В. А. Детков
« » 20 г.
М.П.

Акт внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящий акт составлен о том, что в производственную деятельность ООО «Эвенкиягеофизика» внедрены результаты исследования Щитникова Александра Александровича по теме «Разработка сейсмического канала передачи сообщений в горных выработках» в части разработки преобразователей напряжения для аккумуляторного (суперконденсаторного) питания силовых конденсаторов импульсных сейсмических источников «Енисей» КЭМ-4.

Главный геофизик



Струнов А.В.