

На правах рукописи



ГАВРЮШИН НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ

**ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ
ДВУХРЕЗОНАНСНЫЙ СЕЙСМОПРИЁМНИК ДЛЯ ОХРАННЫХ
СИСТЕМ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре электромеханики, электрических и электронных аппаратов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Курбатов Павел Александрович**

доктор технических наук, проф., профессор кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные

Генин Валерий Семёнович

оппоненты:

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах Чувашского государственного политехнического университета им. И. Н. Ульянова

Иванов Николай Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры 310 электроэнергетических, электромеханических и биотехнических систем Московского авиационного института

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»

Защита диссертации состоится «17» июня 2021 г. в 13 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.024 при ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус Е, ауд. Е-205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ апреля 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
МЭИ.024, к.т.н.



Курбатова Е. П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сейсмоприёмник – прибор, воспринимающий сейсмические колебания и преобразующий их в электрическое напряжение. Электродинамический сейсмоприёмник – сейсмоприёмник, в котором преобразование происходит в результате перемещения катушки в магнитном поле постоянного магнита [1].

Сейсмоприёмники используются в основном для регистрации колебаний грунта, вызванных как естественным, так и искусственным источником, например, землетрясением, взрывом или специальным техническим средством. С использованием сейсмоприёмников в составе измерительных систем изучается глубинное строение Земли, выделяются месторождения полезных ископаемых.

Отдельно стоит отметить применение сейсмоприёмников в системах обнаружения и распознавания объектов, в охранных системах, для регистрации сигналов с определёнными диапазонами частот, создаваемыми объектами обнаружения.

К основным достоинствам электродинамических сейсмоприёмников относятся:

- 1) простота установки на местности;
- 2) небольшие габаритные размеры и малая масса;
- 3) функционирование без внешнего электропитания.

Все эти основные достоинства и сделали электродинамические сейсмоприёмники популярными в сейсморазведке, сейсмологии. Простота установки необходима для уменьшения времени подготовки сейсморазведочных систем к работе и, как следствие, уменьшение времени проведения работ. Небольшие габаритные размеры и малая масса важны при переноске и размещении устройств на местности.

Сейсмоприёмники используются в комплексе с вычислительной аппаратурой, которая потребляет электроэнергию. За счёт того, что функционирование электродинамических сейсмоприёмников происходит без внешнего электропитания, суммарное энергопотребление всей системы практически не зависит от количества используемых в ней сейсмоприёмников, что немаловажно, т. к. в одном комплекте для сейсморазведочных работ может использоваться более 500 сейсмоприёмников [2]. Кроме того, сейсморазведочные работы зачастую производятся в жёстких климатических условиях на местности, удалённой от крупных городов. В таких условиях электропитание обеспечивается какими-либо генераторами, что требует использование дополнительных ресурсов, например, бензина, и накладывает ограничения на время работы системы.

Конструктивно электродинамические сейсмоприёмники представляют собой корпус, с размещёнными в нём многовитковой катушкой и постоянными магнитами. Каркас катушки закреплён через пружины подвеса на корпус. При возникновении внешнего воздействия в виде вибрации или одиночного импульса перемещения на корпус сейсмоприёмника происходит перемещение катушки относительно постоянных магнитов, в результате чего в витках обмотки катушки индуцируется напряжение, которое является выходным сигналом таких

устройств.

При применении сейсмоприёмников в охранных системах для обнаружения и распознавания объектов могут использоваться широкополосные или узкополосные сейсмоприёмники. В первом случае используются сейсмоприёмники с низкой собственной частотой. При таком подходе рабочая область, в которой находятся основные частоты обнаруживаемых объектов, находится за резонансом сейсмоприёмника, при этом для выделения полосы частот, соответствующей объекту обнаружения, осуществляется фильтрация сигнала методом аналоговой, цифровой или аналогово-цифровой обработки сигналов. Однако, у такого подхода имеются недостатки. При осуществлении аналоговой фильтрации увеличиваются габаритно-массовые характеристики сейсмоприёмника, в состав которого добавляются электронные компоненты, необходимые для реализации фильтра. При осуществлении цифровой фильтрации увеличится энергопотребление блока обработки сигналов. При комбинировании способов фильтрации сигнала увеличиваются и габаритно-массовые характеристики сейсмоприёмника, и энергопотребление блока обработки сигналов. При необходимости решения задачи обнаружения двух объектов с разными основными частотами потребуется выделить двух частотных диапазонов аналогичным образом, что приведёт к ещё большему увеличению габаритно-массовых характеристик сейсмоприёмника или энергопотребления блока обработки сигналов.

Во втором случае используются узкополосные сейсмоприёмники с собственной частотой, совпадающей с основной частотой объекта обнаружения. В таком случае сейсмоприёмники являются механическим фильтром и не требуют дополнительной фильтрации входного сигнала, что позволяет реализовать устройство со сравнительно меньшими габаритно-массовыми характеристиками и энергопотреблением блока обработки сигналов. Однако, у такого подхода имеется недостаток. При необходимости обнаружения двух объектов с разными основными частотами потребуется использовать два сейсмоприёмника, каждый из которых будет настроен на необходимую частоту. Кроме того, из-за увеличения количества датчиков возрастёт и энергопотребление блока обработки сигналов.

В этом исследовании, для более качественного решения задачи обнаружения двух объектов, имеющих разные основные частоты, предполагается разработать избирательный электродинамический двухрезонансный сейсмоприёмник (ЭЛДС), т. е. сейсмоприёмник с двумя собственными частотами в рабочем диапазоне частот, предназначенный для регистрации сейсмических сигналов в составе автономных охранных систем. При этом собственные частоты ЭЛДС будут совпадать с основными частотами объектов обнаружения. Такое устройство будет лишено недостатков подходов, рассмотренных ранее.

Актуальность темы. Существует множество запатентованных топологий, вариантов конструкций сейсмоприёмников, а также методик проектирования и моделирования сейсмоприёмников, однако, исследования с целью уменьшения габаритно-массовых характеристик и увеличения чувствительности проводятся

до сих пор, что подтверждается большим числом публикаций в этом направлении.

Разработка методик моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников для применения в составе охранных системах является актуальной задачей, так как позволяет улучшить технические характеристики систем, в составе которых они применяются, и осуществить поиск новых более эффективных технических решений, повышающих энергоэффективность и материалоёмкость продукции.

В результате проведённого патентного поиска и анализа научной литературы не обнаружена информация об исследованиях, связанных с разработкой избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, что также свидетельствует об актуальности выполненного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Считается, что первый сейсмоскоп, способный лишь указывать направление на эпицентр землетрясения, был изобретён Чжан Хэном в 132 году в Китае.

История развития сейсмоприёмников, предназначенных для измерения параметров сейсмических волн, начинается с ирландского инженера Роберта Маллета, который в 1846 году с помощью примитивного сейсмоскопа выполнил уникальные для того времени опыты по определению скорости сейсмических волн в песках и скальных горных породах.

Первый электродинамический сейсмограф, основанный на явлении электромагнитной индукции, был изобретён российским князем, геофизиком Борисом Борисовичем Голицыным в 1906 году. С тех пор проводятся исследования с целью поиска оптимальных конструкций, вариантов подвеса подвижной массы. Такие исследования проводятся и в настоящее время во многих странах.

Примерами разработчиков и изготовителей сейсмоприёмников в настоящее время являются: АО «ОКБ «Октава» Российская Федерация, Sercel Франция, Geospace Technologies Corporation Соединённые Штаты Америки, China Geological Equipment Group Co., LTD Китай и другие. Модельный ряд всех перечисленных компаний весьма разнообразен. Электродинамические сейсмоприёмники отличаются габаритными размерами, чувствительностью, собственной частотой и рабочим диапазоном частот.

Разработчики охранных систем обычно используют существующие сейсмоприёмники или заказывают разработку сейсмоприёмников с необходимыми характеристиками у фирм-изготовителей, например, у ООО «Геоспейс технолоджис Евразия» [3]. Примерами охранных систем с использованием сейсмоприёмников являются: автономный сигнализационный комплекс «Радиобарьер», система автономной сейсморегистрации «Радиодозор», мобильный сигнализационный комплекс «Кайман» [4], сейсмическая система охраны серии «Кайма» [5].

Несмотря на большое количество запатентованных топологий, вариантов конструкций сейсмоприёмников, а также методик проектирования и моделирования сейсмоприёмников, исследования с целью уменьшения

габаритно-массовых характеристик и увеличения чувствительности проводятся до сих пор, что подтверждается большим числом публикаций в этом направлении.

Объектом исследования является избирательный электродинамический двухрезонансный сейсмоприёмник.

Предметом исследования является анализ электромагнитных и динамических процессов избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника, а также обоснование конструктивных решений, использованных при его проектировании.

Целью диссертационной работы является создание электродинамического сейсмоприёмника, обеспечивающего избирательность и высокую чувствительность на двух заданных частотах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выполнить аналитический обзор известных конструкций электродинамических сейсмоприёмников. Определить существующие методические проблемы, возникающие при их проектировании и моделировании.

2. Обосновать необходимость разработки избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника для применения в составе автономных охранных системах и сформулировать требования к разрабатываемому образцу.

3. Разработать методику моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников.

4. Разработать топологию и конструкцию электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника.

5. Выполнить расчётно-теоретические исследования, связанные с конструкцией избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника для подтверждения выполнения требований к разрабатываемому образцу.

6. Разработать эскизную конструкторскую документацию на опытный образец избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника.

7. Выполнить экспериментальные исследования опытных образцов избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников для подтверждения достоверности полученных теоретических результатов и подтверждения выполнения требований к разрабатываемому образцу.

Методы решения поставленных задач. Для решения поставленных задач использованы численные методы моделирования динамики подвижных элементов, численные методы моделирования электромагнитных полей, экспериментальные исследования.

В результате выполненной работы были получены следующие **новые научные результаты**:

1. Разработана методика моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников предложенной в

работе топологии, основанная на сочетании цепных макроскопических моделей и полевого анализа электромагнитных и механических процессов, высокая достоверность которых подтверждена данными экспериментальных исследований.

2. Предложены три новые топологии избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, отличающихся высокой чувствительностью на выбранных частотах и компактностью конструкции, подтверждённые патентами на полезную модель.

3. Разработана комплексная математическая модель функционирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников в реальных условиях, включающая моделирование источника вибрации, передачу вибрации через грунт на корпус сейсмоприёмника и расчёт выходного сигнала сейсмоприёмника, достоверность которой подтверждена данными экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований, положительными рецензиями на публикации и отзывами на научных конференциях.

Практическая значимость:

1. Разработана новая конструкция избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника, обладающего высокими избирательностью и чувствительностью на выделенных характерных частотах.

2. Определена возможность распространения и использования методики моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников при проектировании аналогичных устройств с отличающимися характеристиками, например, с другой чувствительностью, или с другими собственными частотами, позволяющей сократить сроки их создания.

3. Получены новые данные расчётных и экспериментальных исследований функционирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, в том числе в условиях, приближённых к условиям реального применения.

Личный вклад автора:

1. Разработана методика моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников предложенной в работе топологии, основанная на сочетании цепных макроскопических моделей и полевого анализа электромагнитных и механических процессов, высокая достоверность которых подтверждена данными экспериментальных исследований.

2. Предложены новые топологии избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, отличающихся высокой чувствительностью на выбранных частотах и компактностью конструкции, подтверждённые патентами на полезную модель.

3. Разработана комплексная математическая модель функционирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников в реальных условиях, включающая моделирование источника вибрации, передачу вибрации через грунт на корпус сейсмоприёмника и расчёт выходного сигнала

сейсмоприёмника, достоверность которой подтверждена данными экспериментальных исследований.

4. Разработана новая конструкция избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника, обладающего высокими избирательностью и чувствительностью на выделенных характерных частотах.

5. Выполнение всех приведённых в работе расчётов.

6. Участие в экспериментальных исследованиях.

Апробация работы. Научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

27й Международный семинар «27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED 2020)», 27-30 сентября 2020 г., Российская Федерация, г. Москва;

2я Международная конференция «The 2nd IEEE 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (IEEE REEPE 2020)», 12-14 марта 2020 г., Российская Федерация, г. Москва;

XI Международная конференция «2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)», 04-07 октября 2020 г., Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ: из них 3 статьи, входящие в международную базу данных Scopus; 3 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка использованной литературы из 99 наименований. Основная часть работы изложена на 98 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунок и 5 таблиц. Приложение изложено на 6 страницах машинописного текста и содержит 3 таблицы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников предложенной в работе топологии.

2. Три топологии избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников.

3. Комплексная математическая модель функционирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников в реальных условиях, включающая моделирование источника вибрации, передачу вибрации через грунт на корпус сейсмоприёмника и расчёт выходного сигнала сейсмоприёмника.

4. Конструкция избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника.

5. Данные расчётных и экспериментальных исследований избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенного исследования, изложены цели и задачи диссертационной работы, описаны методы решения поставленных задач и структура диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ текущего состояния развития электродинамических сейсмоприёмников» рассмотрены примеры применения электродинамических сейсмоприёмников. Рассмотрены существующие топологии сейсмоприёмников, их конструкции, формы пружин подвеса.

Рассмотрены методики проектирования и моделирования электродинамических сейсмоприёмников, опубликованные в научной литературе. Отмечены их недостатки, вызванные различными допущениями, которые необходимо доработать или устранить для улучшения сходимости и качества разрабатываемых изделий.

В результате проведённого патентного поиска и анализа научной литературы не обнаружена информация об исследованиях, связанных с разработкой избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, то есть сейсмоприёмников с двумя собственными частотами в рабочем диапазоне частот.

Во второй главе «Методика моделирования электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников» приведены существующие подходы использования электродинамических сейсмоприёмников в составе охранных систем для обнаружения объектов с определённой собственной частотой. Отмечены их недостатки при необходимости решения задачи обнаружения двух объектов с разными основными частотами, которые заключаются в увеличении габаритно-массовых характеристик сейсмоприёмника или энергопотребления блока обработки сигналов.

Для более качественного решения задачи обнаружения двух объектов, имеющих разные основные частоты, предложено разработать избирательный электродинамический двухрезонансный сейсмоприёмник (ЭЛДС), т. е. сейсмоприёмник с двумя собственными частотами в рабочем диапазоне частот, предназначенный для регистрации сейсмических сигналов в составе автономных охранных систем. Собственные частоты ЭЛДС должны совпадать с основными частотами объектов обнаружения. Такое устройство будет лишено недостатков подходов, рассмотренных ранее.

Сформулированы требования к разрабатываемому ЭЛДС:

1) Габаритные размеры должны быть сопоставимы или меньше, чем у существующих электродинамических сейсмоприёмников с одной собственной частотой.

2) Собственные частоты должны иметь значения: $f_{C1} = 20 \pm 3$ Гц, $f_{C2} = 60 \pm 3$ Гц.

3) Пиковые значения коэффициента преобразования при воздействии частот, совпадающих с собственными частотами ЭЛДС, должны быть не менее $25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}}$, при этом их изменение при наклоне ЭЛДС при установке с наклоном до 30° от вертикали в любую сторону не должны изменяться более, чем на 20%.

4) Границы рабочего диапазона с учётом нахождения в нём полного спектра сигналов: $f_H = 10$ Гц, $f_K = 100$ Гц.

Для обеспечения двух собственных частоты в рабочем диапазоне частот были разработаны варианты топологий избирательных ЭЛДС, представленные на рисунке 1. Все приведённые топологии защищены патентами на полезную модель.

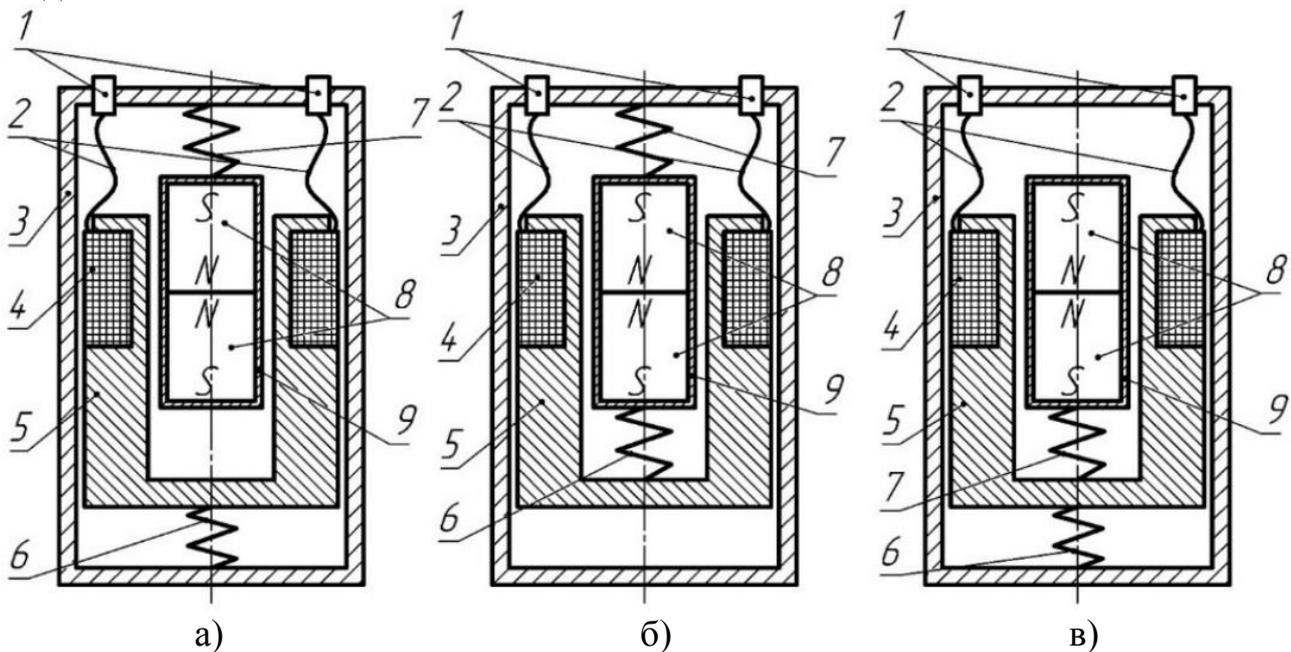


Рисунок 1 – Варианты топологий ЭЛДС

На рисунке 1 а) представлена топология ЭЛДС, в которой к корпусу 3 при помощи пружины 7 крепится втулка 9 с постоянными магнитами 8, расположенными друг к другу одинаковыми полюсами, при этом магниты устанавливаются с отсутствием зазора. К корпусу 3 при помощи пружины 6 крепится каркас 5 с многовитковой катушкой 4, выводы 2 которой соединены с контактами 1 на корпусе ЭЛДС.

На рисунке 1 б) представлена топология ЭЛДС, отличающаяся от изображённой на рисунке 1 а) тем, что каркас катушки 5 крепится пружиной 6 не к корпусу 3, а к втулке 9 с постоянными магнитами 8.

На рисунке 1 в) представлена топология ЭЛДС, отличающаяся от изображённой на рисунке 1 а) тем, что втулка 9 с постоянными магнитами 8 крепится пружиной 7 не к корпусу 3, а к каркасу катушки 5.

Во всех вариантах топологий изображено по одной пружине, удерживающей каркас катушки и втулку с постоянными магнитами, это сделано для упрощения, здесь имеется в виду упругий элемент с определённой осевой жёсткостью, количество пружин и их форма, обеспечивающих эту жёсткость, определяются при разработке конструкции ЭЛДС.

Функционирование ЭЛДС происходит в следующей последовательности. При воздействии на корпус 3 внешнего воздействия, например, вибрации или одиночного импульса перемещения, вдоль его оси происходит колебание каркаса 5 с многовитковой катушкой 4 и втулки 9 с постоянными магнитами 8 в том же направлении. При этом, при перемещении многовитковой катушкой 4 относительно постоянных магнитов 8 в витках катушки индуцируется напряжение, которое через выводы 2 передаётся на контакты 1 и является выходным сигналом устройства. Требуемые значения собственных частот ЭЛДС обеспечиваются выбором значений колеблющихся масс 4 и 5, 8 и 9 и жёсткостей пружин 6 и 7. Максимальные значения напряжения U при этих частотах достигаются оптимизацией магнитной подсистемы.

Для оценки соответствия требованиям к разрабатываемому образцу для топологии, представленной на рисунке 1 в), разработана математическая модель функционирования ЭЛДС. При моделировании процессов ЭЛДС был разделён на подсистемы с одним видом преобразуемой энергии: магнитную, механическую, электрическую. Общая математическая модель объединяет цепные макроскопические модели подсистем.

Электрическая подсистема представляет передачу энергии электрического тока, индуцированного в многовитковой катушке, к внешнему потребителю и характеризуется электрическим сопротивлением катушки и потребителя.

В механической подсистеме происходит преобразование механической энергии движения корпуса, вызванного внешним воздействием, например, вибрацией или одиночным импульсом перемещения, в движение каркаса с многовитковой катушкой и втулки с постоянными магнитами. Кинематическая схема ЭЛДС представлена на рисунке 2, где 1 – корпус, 2 – пружина с жёсткостью k_1 , 3 – каркас с многовитковой катушкой массой m_1 , 4 – пружина с жёсткостью k_2 , 5 – втулка с постоянными магнитами массой m_2 . $x_k(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ – законы движения корпуса, каркаса с обмоткой и втулки с постоянными магнитами во времени t , соответственно.

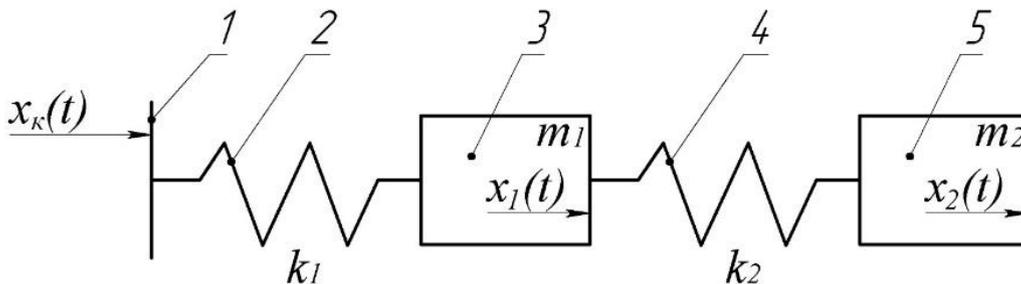


Рисунок 2 – Кинематическая схема ЭЛДС

Уравнения колебаний системы:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1(t) = -k_1(x_1(t) - x_k(t)) + k_2(x_2(t) - x_1(t)) \\ m_2 \ddot{x}_2(t) = -k_2(x_2(t) - x_1(t)) \end{cases} \quad (1)$$

Получено аналитическое решение для собственных частот уравнений

механической подсистемы:

$$f_{1,2} = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{8\pi^2 m_1} + \frac{k_2}{8\pi^2 m_2} \pm \frac{\sqrt{-64\pi^4 k_1 k_2 m_1 m_2 + 16\pi^4 (k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2)^2}}{32\pi^4 m_1 m_2}}. \quad (2)$$

В магнитной подсистеме осуществляется распределение энергии магнитного поля, существующего в постоянных магнитах, в окружающем пространстве. Для расчёта магнитной подсистемы использовалось стационарное уравнение:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 (\mathbf{J} + \nabla \times \mathbf{M}), \quad (3)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, \mathbf{J} – вектор плотности тока, \mathbf{M} – вектор намагниченности.

Для составления общей математической модели при расчёте магнитной подсистемы необходимо вычислить потокосцепление и силу Лоренца:

$$\Psi = \int_L \mathbf{A} d\mathbf{l}, \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_L = \iiint (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV, \quad (5)$$

где Ψ – потокосцепление, L – длина проводника, образующего витки катушки, \mathbf{F}_L – вектор силы Лоренца.

Общая математическая модель ЭЛДС должна объединять все три подсистемы и учитывать их взаимное влияние. При проведении исследования общая математическая модель ЭЛДС составлена с использованием языка Modelica и представлена на рисунке 3.

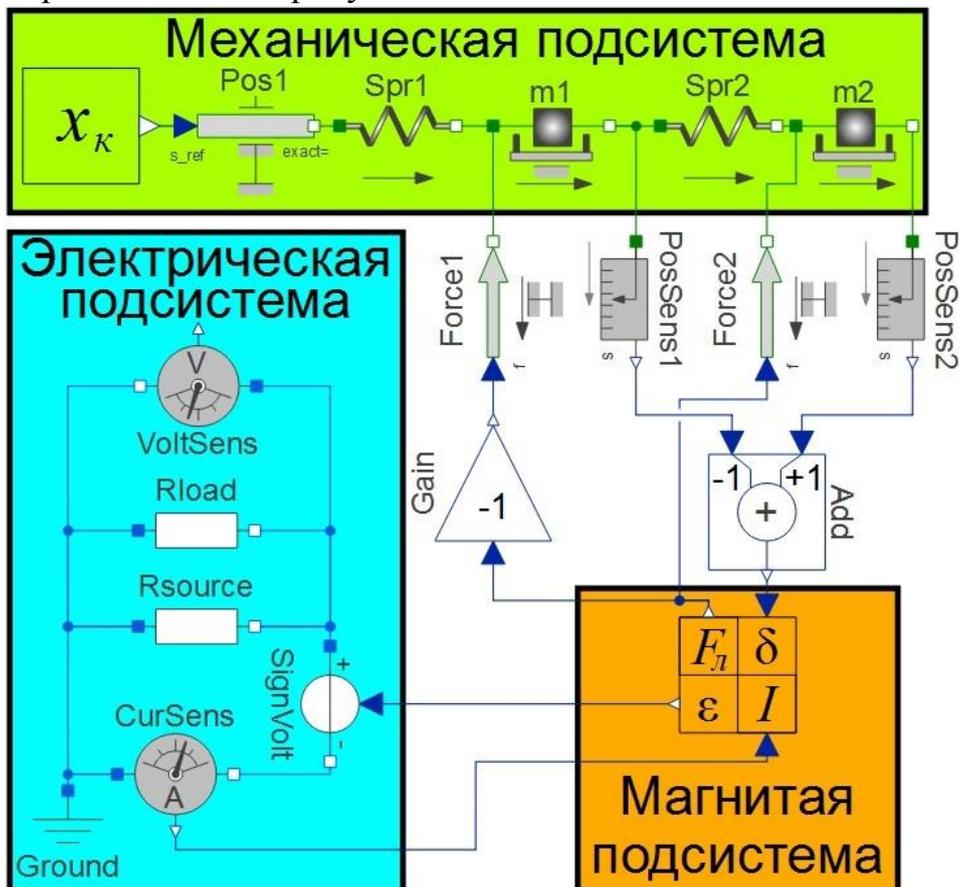


Рисунок 3 – Общая математическая модель ЭЛДС

Общая математическая модель ЭЛДС, представленная на рисунке 3, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1(t) = -k_1(x_1(t) - x_k(t)) + k_2(\delta(t)) - F_L(\delta(t), I(t)) - m_1 g \\ m_2 \ddot{x}_2(t) = -k_2(\delta(t)) + F_L(\delta(t), I(t)) - m_2 g \\ \delta(t) = x_2(t) - x_1(t); \\ I(t)R = -\left(\frac{\partial \Psi(\delta(t), I(t))}{\partial \delta} \frac{d\delta(t)}{dt} + \frac{\partial \Psi(\delta(t), I(t))}{\partial I} \frac{dI(t)}{dt} \right) \end{cases} .$$

Опираясь на математическую модель, разработана методика моделирования ЭЛДС с топологией, представленной на рисунке 1 в):

1) Зная объекты обнаружения и диапазоны их собственных частот, выбираются собственные частоты разрабатываемого ЭЛДС, находящиеся в серединах этих диапазонов.

2) Исходя из поставленной задачи и имеющихся ограничений, например, габаритно-массовых характеристик, разрабатывается первичная компоновка ЭЛДС, при которой пружины подвеса и элементы корпуса не прорабатываются. По разработанной трёхмерной модели рассчитываются значения масс подвижных элементов, ориентировочные предельно возможные перемещения масс, геометрические размеры многовитковой катушки (сечение катушки).

3) По разработанной геометрии трёхмерной модели производится расчёт магнитной подсистемы, вычисляются функции потокосцепления и силы Лоренца в соответствии с уравнениями (2.17), (2.18). Выполняется их аппроксимация в соответствии с уравнениями (2.20), (2.21). Уравнения (2.21) и (2.22) записываются в пользовательский модуль общей математической модели.

4) Значения собственных частот ЭЛДС и масс подвижных элементов, полученных при предварительной разработке компоновки ЭЛДС подставляются в уравнение (2.11). В результате решения уравнения получаются два набора решений жёсткостей пружин, из которых выбирается наиболее приемлемый. Например, в этом исследовании был выбран набор решений, в котором разница между двумя жёсткостями минимальна. Значения масс и жёсткостей подставляются в соответствующие элементы механической подсистемы общей математической модели.

5) Выбирается тип и диаметр провода многовитковой катушки с целью максимизации количества витков в сечении многовитковой катушки с учётом технологических ограничений изготовления. Выполняется расчёт электрического сопротивления многовитковой катушки. В блоки электрической подсистемы подставляется значение электрического сопротивления многовитковой катушки и реализуется электрическая схема измерения напряжения.

6) Производится расчёт амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого ЭЛДС, по которой производится предварительная оценка соответствия требованиям к разрабатываемому устройству.

7) Выполняется оптимизация магнитной подсистемы с учётом предельно возможных перемещений многовитковой катушки и постоянных магнитов.

8) С учётом выполненной оптимизации магнитной подсистемы уточняется предварительная компоновка: корректируется геометрия, значения масс подвижных элементов, их предельно возможные перемещения. После чего повторно выполняются пункты 3-6.

9) Выполняется конструкторская проработка элементов ЭЛДС, включающая в себя моделирование пластинчатых пружин, обеспечивающих рассчитанные значения осевых жёсткостей. При невозможности реализации пластинчатых пружин с требуемыми характеристиками хода и жёсткости в имеющейся компоновке необходимо изменить компоновку или габаритные размеры разрабатываемого ЭЛДС, после чего повторно выполнить пункты 2-8.

10) Производится расчёт амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого ЭЛДС, по которой производится итоговая оценка соответствия требованиям к разрабатываемому устройству.

В третьей главе «Расчётные исследования электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника» выполнено моделирование ЭЛДС по методике, представленной во второй главе, в результате которого рассчитана амплитудно-частотная характеристика. Собственные частоты имеют значения 20 и 60 Гц, при этом коэффициенты преобразования на этих частотах составляют 41,05 и 161,02 В/м/с, соответственно.

Проработана компоновка ЭЛДС, представленная на рисунке 4, и достигнуты габаритные размеры: Ø 30 мм, высота 25,8 мм. В корпусе 5 на двух одинаковых пластинчатых пружинах 3 подвешен сборный каркас 4 с многовитковой катушкой 7. Использование двух одинаковых пружин с разнесёнными местами подвеса необходимо для исключения нежелательных форм движения подвижных масс: крутильных, изгибных. Пластинчатые пружины 3 разделены между собой проставочным кольцом 9. Сверху корпус закрыт крышкой 1. В корпусе 5 и проставочном кольце 9 есть совмещённые отверстия, необходимые для пропускания выводных проводов 8, подпаянных к многовитковой катушке 7. К каркасу 4 на двух одинаковых пластинчатых пружинах 6 подвешена втулка 10 с постоянными магнитами 2. Для монтажа в объект на корпусе 5 предусмотрена наружная резьба М24х0,75-8g.

Для подвеса подвижных масс были разработаны пластинчатые пружины подвеса с траверсами постоянной ширины, использующих в качестве направляющих траекторию Архимедовой спирали, для которых выполнены необходимые расчёты, подтверждающие обеспечение заданных осевых жёсткостей при заданных значениях хода и выполнении условий по прочности. Формы пружин подвеса и результаты прочностного расчёта представлены на рисунке 5.

Для оценки влияния нелинейности жёсткостей пластинчатых пружин подвеса на собственные частоты разрабатываемого ЭЛДС, а также других возможных форм колебания, на основе твердотельной модели выполнен был расчёт собственных частот, в результате которого получены формы

колебаний, представленные на рисунке 6.

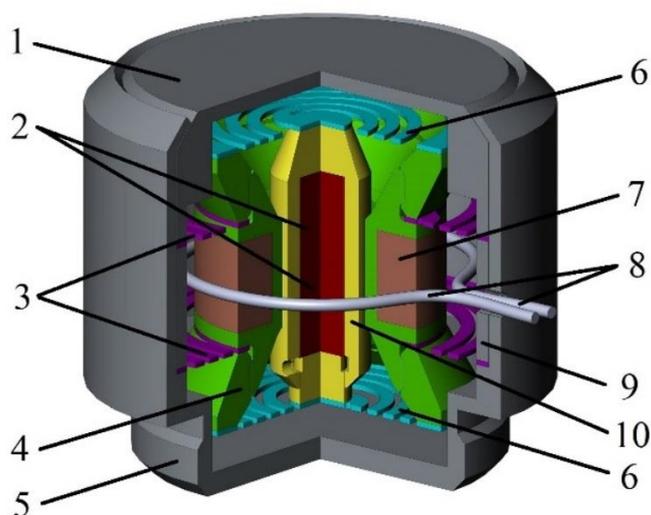


Рисунок 4 – Компоновка ЭЛДС

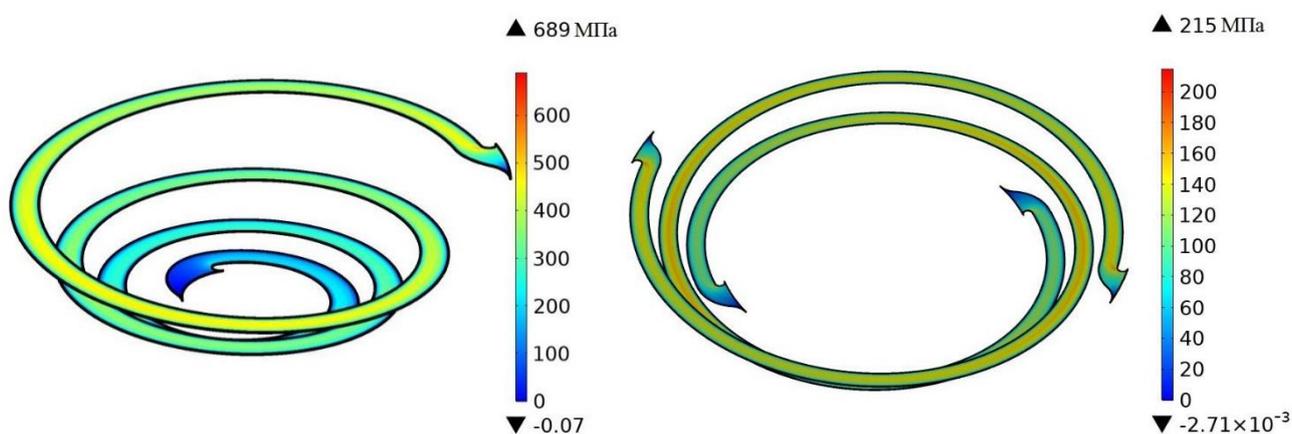


Рисунок 5 – Результаты прочностного расчёта пластинчатых пружин ЭЛДС

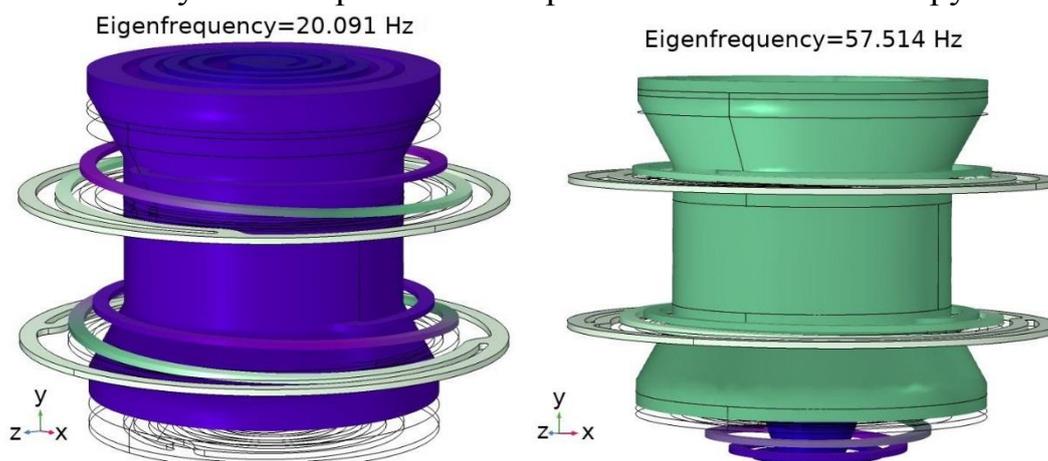


Рисунок 6 – Собственные частоты и формы колебаний колебательной системы ЭЛДС

На основе твердотельной модели выполнены расчёты по оценке влияния отклонений, возникающих в процессе производства, на функционирование электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника, вызванных наличием отклонений в процессе изготовления, в результате которых

установлено, что даже при наличии максимально возможных отклонений значения собственных частот по-прежнему удовлетворяют требованиям к разрабатываемому образцу.

На основе твердотельной модели выполнены расчёты по оценке влияния на функционирование угла наклона при установке на местности электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника. В результате расчётов установлено, что при угле наклона 37° относительное смещение уменьшилось на 20%, что соответствует требованиям к разрабатываемому образцу. График зависимости относительного смещения втулки с постоянными магнитами и многовитковой катушки от угла наклона ЭЛДС и частоты внешнего воздействия представлен на рисунке 7.

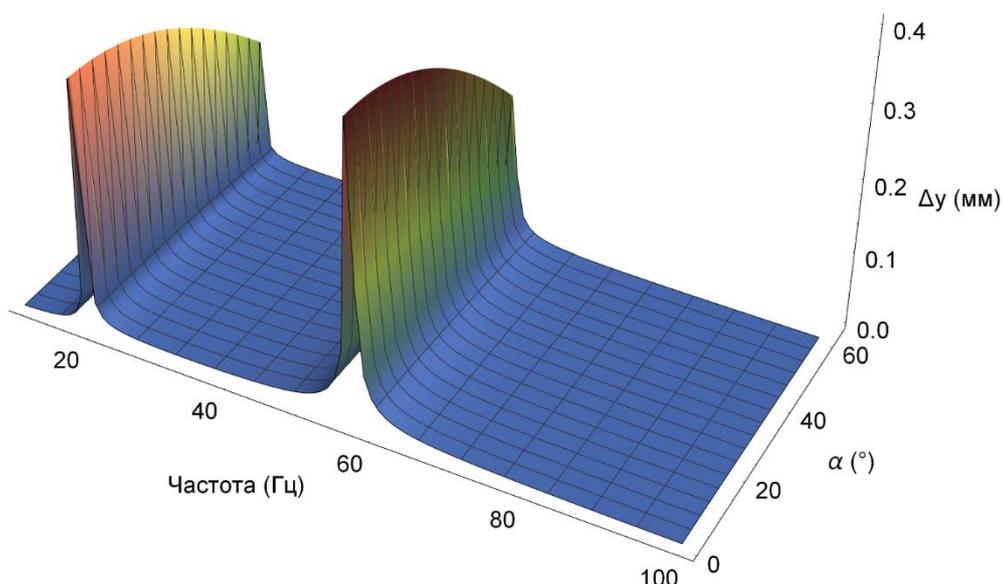


Рисунок 7 – Частотный отклик ЭЛДС

Для предварительной оценки радиуса обнаружения объектов охранными системами, имеющими в составе электродинамический двухрезонансный сейсмоприёмник, разработана математическая модель движения грунта после сейсмического события, расчётная схема которой представлена на рисунке 8.

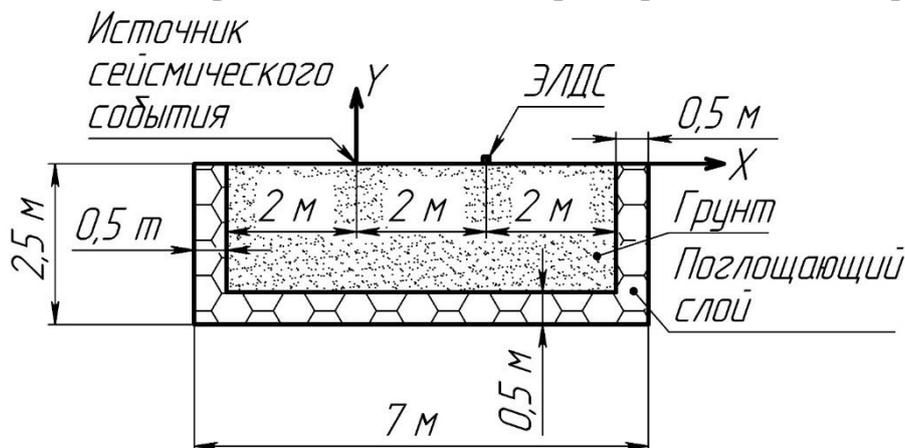


Рисунок 8 – Расчётная схема математической модели передачи сейсмического события через грунт на корпус ЭЛДС

В качестве вывода отмечено, что разработанный ЭЛДС в соответствии с результатами проведённых расчётных исследований полностью удовлетворяет

требованиям к разрабатываемому образцу.

В четвёртой главе «Изготовление и экспериментальные исследования электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников» приведено описание изготовления двух опытных образцов ЭЛДС, один из которых используется для демонстрации компоновки устройства в виде разрезного макета, а другой использовался для экспериментальной верификации представленных ранее математических моделей и расчётов. Фото деталей ЭЛДС и разрезного макета представлены на рисунке 9.

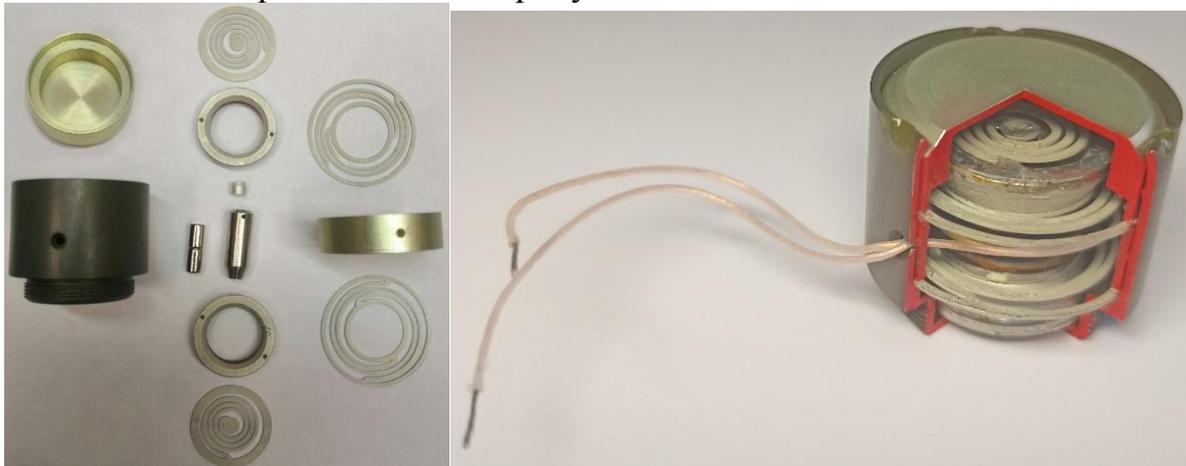


Рисунок 9 – Фото деталей и разрезного макета опытного образца ЭЛДС

Выполнена экспериментальная работа по измерению амплитудно-частотной характеристики опытного образца ЭЛДС, в результате которой проведено сравнение экспериментально полученных значений с расчётными. Сравнение представлено на рисунке 10.

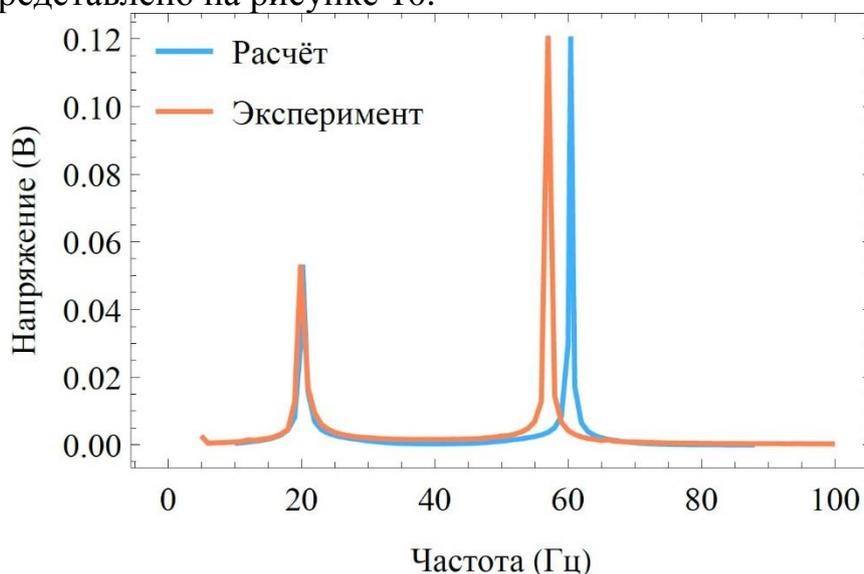


Рисунок 10 – Сравнение амплитудно-частотных характеристик ЭЛДС, полученных расчётным и экспериментальным методами

Выполнена экспериментальная работа по записи сигнала шага человека, спектр которого изображён на рисунке 11. Произведена обработка сигнала, после которой записанный сигнал использовался как источник при моделировании отклика сейсмоприёмника, находящегося на некотором расстоянии от сейсмического события. Произведено сравнение скоростей корпуса

сейсмоприёмника, полученных экспериментальным и расчётным способом, в результате которого отмечена их хорошая сходимость в первые 20 мс. Результаты сравнения представлены на рисунке 12. Выполнено моделирование функционирования электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника для оценки его выходного сигнала при воздействии полученных значений скоростей.

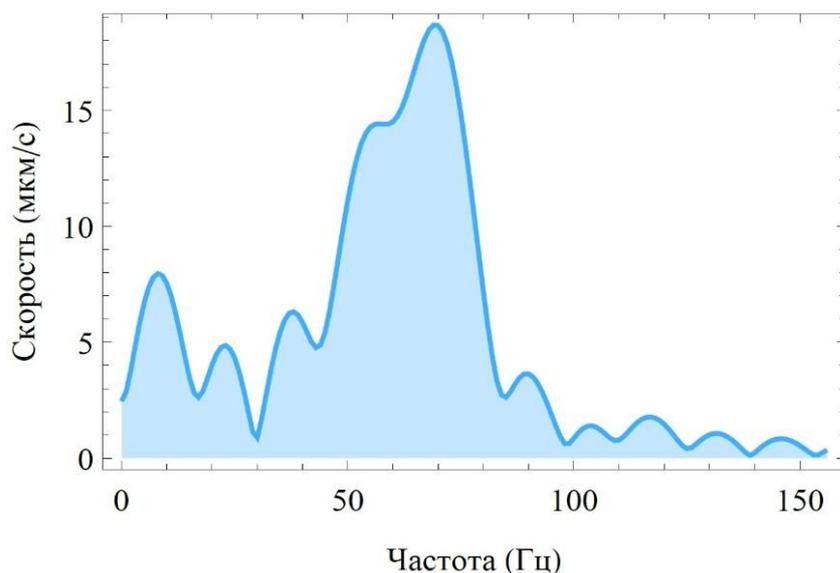


Рисунок 11 – Спектр одного шага человека на расстоянии 2 м от сейсмоприёмника

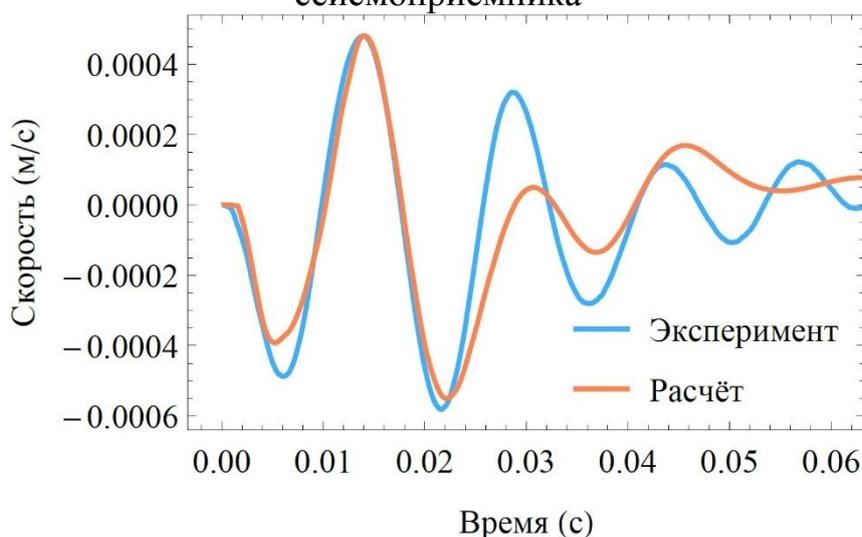


Рисунок 12 – Сравнение скоростей корпуса сейсмоприёмника, полученных экспериментальным и расчётным способом

В выводах главы отмечено, что разработанный ЭЛДС полностью удовлетворяет требованиям к разрабатываемому образцу, а разработанные математические модели и выполненные ранее расчётные исследования верифицированы хорошей сходимостью с результатами экспериментальных работ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель диссертационной работы по созданию электродинамического сейсмоприёмника, обеспечивающего избирательность и высокую чувствительность на двух заданных частотах, достигнута полностью. Основные полученные результаты работы:

1. Для применения в составе автономных охранных системах обоснована необходимость разработки избирательных ЭЛДС для более качественного решения задачи обнаружения двух объектов, имеющих разные основные частоты. Сформулированы основные требования к разрабатываемому ЭЛДС.

2. Разработаны три новые топологии избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников, отличающиеся высокой чувствительностью на выбранных частотах и компактностью конструкции, подтверждённые патентами на полезную модель.

3. Разработана методика моделирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников предложенных в работе топологий основанная на сочетании цепных макроскопических моделей и полевого анализа электромагнитных и механических процессов, высокая достоверность которой подтверждена данными экспериментальных исследований.

4. Разработана комплексная математическая модель функционирования избирательных электродинамических двухрезонансных сейсмоприёмников в реальных условиях, включающая моделирование источника вибрации, передачу вибрации через грунт на корпус сейсмоприёмника и расчёт выходного сигнала сейсмоприёмника, достоверность которой подтверждена данными экспериментальных исследований.

5. На основе расчётных исследований разработана новая конструкция избирательного электродинамического двухрезонансного сейсмоприёмника, обладающего высокими избирательностью и чувствительностью на выделенных характерных частотах.

6. Разработана эскизная конструкторская документация на электродинамический двухрезонансный сейсмоприёмник и изготовлены опытные образцы, составляющие технический задел для дальнейших исследований.

7. Выполнены экспериментальные работы, подтверждающие достоверность проведённых расчётов, а также выполнение требований к разрабатываемому образцу.

8. Созданные в результате выполнения диссертационной работы математические модели и методика моделирования электродинамических сейсмоприёмников, подтверждённые экспериментальными исследованиями, имеют возможность распространения при проектировании аналогичных устройств с отличающимися характеристиками, например, с другой чувствительностью, или с другими собственными частотами, позволяющей сократить сроки их создания.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в международную базу данных Scopus

1. **Gavryushin N.**, Dergachev P., Kurbatov P. Mathematical model of the electrodynamic seismic sensor with two mechanic oscillation circuits // 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). – 2020. – с. 1. DOI: 10.1109/IWED48848.2020.9069586.
2. **Gavryushin N.**, Dergachev P., Kurbatov P. Design of the electrodynamic seismic sensor with two mechanic oscillation circuits // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – 2020. – с. 1. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059116.
3. **Gavryushin N.**, Dergachev P., Kurbatov P. Detecting the seismic event by the electrodynamic seismic sensor // 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – 2020. – с. 1. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249343.

Патенты

4. Пат. RU 195628 U1 Российская Федерация, МПК⁷ G01V 1/16, G01V 1/18. Электродинамический двухрезонансный сейсмоприемник / **Гаврюшин Н.Ю.**, Кандидатов И.А., Попов А.В., Смирнов И.М.; Заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-исследовательский инженерный институт" (АО "НИИИ"). – № 2019136437; заявл. 12.11.2019; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4. – 1 с.
5. Пат. RU 195629 U1 Российская Федерация, МПК⁷ G01V 1/16, G01V 1/18. Электродинамический сейсмоприемник / **Гаврюшин Н.Ю.**, Дергачев П.А., Карамалькин Т.А., Курбатов П.А.; Заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-исследовательский инженерный институт" (АО "НИИИ"). – № 2019136439; заявл. 12.11.2019; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4. – 1 с.
6. Пат. RU 195631 U1 Российская Федерация, МПК⁷ G01V 1/16, G01V 1/18. Электродинамический сейсмоприемник с двумя собственными частотами / **Гаврюшин Н.Ю.**; Заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-исследовательский инженерный институт" (АО "НИИИ"). – № 2019136436; заявл. 12.11.2019; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4. – 1 с.