На правах рукописи

ВОСКРЕСЕНСКИЙ Михаил Николаевич

РАЗРАБОТКА АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ РЕГИСТРАТОРА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ «РЕГИСТР» ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И СРЕД

Специальность 25.00.10 – Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН

Научный руководитель:	**Сенин Лев Николаевич**
доктор технических наук	Заведующий лабораторией сейсмометрии Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)
Официальные оппоненты:	**Колесников Юрий Иванович**
доктор технических наук	Главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)
кандидат технических наук	**Антоновская Галина Николаевна** Заведующая лабораторией сейсмологии Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Академика Н.П. Лаверова Российской академии наук (г. Архангельск)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет", кафедра геофизики (г. Пермь)

Защита диссертации состоится « 05 »__октября___2017 г. в __14-00__ на заседании диссертационного Совета Д 004.009.01 при ФГБУН Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН по адресу: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Автореферат разослан «_03_»___июля___2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор Ю. В. Хачай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования прежде всего связана с современными требованиями обеспечения безопасности человека. В данной работе в основном речь идет о безопасности строительных гражданских и промышленных объектов: в первую очередь об оборудовании, спроектированном для мониторинга целостности конструкции зданий и сооружений. Разработанные и внедренные функциональные узлы оборудования помогут решать инженерные геофизические задачи, направленные на предотвращение разрушения объекта (в соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011: «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»).

В процессе проектирования, строительства или эксплуатации любого объекта антропогенной среды наблюдается непрерывное взаимное воздействие и влияние упругих волн на пару «объект - среда». Это влияние может быть выраженно в виде разрушения подземных коммуникаций во время прихода сейсмической волны, в изменении частоты колебаний строительного объекта под воздействием ветровых нагрузок или же взаимным изменением сейсмодинамических характеристик (далее – СДХ) уже существующих строительных объектов в результате проведения близлежащей разработки верхней части геологического разреза. Причинами аварий строительных конструкций часто становятся дефекты, образующиеся в результате действия различных факторов окружающей среды, многие из которых рассмотрены на реальных примерах следующими авторами: Сендеров Б.В., Еремин К.И.

Для своевременного выявления причин и предотвращения разрушения антропогенных объектов, особенно в сейсмически опасных районах, желательно проводить мониторинг СДХ.

Для оперативности принятия решения аппаратно-программный комплекс, предназначенный для измерения СДХ, должен быть удобен в использовании в полевых условиях. Комфорт для оператора прибора можно оценить по следующим характеристикам: малые габариты и вес, длительность автономной работы, возможность использования персонального компьютера (PC) для обработки данных,

простота метода работы и удобный, интуитивно понятный интерфейс программного обеспечения.

Цель работы

Целью данной работы является разработка аппаратных и программных модулей регистратора сейсмических сигналов «Регистр» (далее – регистр или регистратор) для получения возможности оперативного измерения и изучения сейсмодинамических характеристик любых строительных объектов, гражданского или промышленного назначения, а также наземных участков верхней части геологического разреза.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Провести сравнительный анализ функционала аппаратно-программных комплексов, предназначенных для мониторинга сейсмодинамических характеристик. Как следствие, определить конкретные функциональные узлы регистратора, подлежащие изменению.
2. Встроить в «Регистр» GPS модуль (на уровне макетной платы).
3. Исследовать возможности увеличения скорости обмена данными между регистратором и персональным компьютером.
4. Внедрить в регистратор съемную карту памяти.
5. Написать программу для вычисления сейсмодинамических характеристик.
6. Провести лабораторные и полевые опробования разработанных модулей.

Научная новизна

Сформулированные цели и задачи реализованы автором в лаборатории сейсмометрии Института геофизики УрО РАН в соответствии с темой плана НИР (Разработка системы сейсмодинамического мониторинга).

Базовой аппаратно-программной разработкой в отмеченных исследованиях являлся регистратор сейсмических сигналов «Регистр».

1. На макетной плате реализован и отлажен модуль определения координат и точного всемирного времени, на основе GPS Quectel L10.

2. Разработан механизм обмена данными регистратора с компьютером посредством переходника FT245. Увеличена скорость передачи данных в десять раз.
3. В регистратор введена возможность использования внешней карты памяти, что позволило применить «Регистр» в сейсмологических наблюдениях с большей эффективностью.
4. Написана программа для вычисления сейсмодинамических характеристик: резонансная частота колебаний, амплитуда смещения, декремент затухания.

Описанные выше изменения, внедренные в базовую модель «Регистр», позволяют увеличить эффективность полевых работ: отсутствие дополнительного оборудования (внешнего GPS приемника), а также наличие возможности длительной автономной записи и увеличенная скорость передачи данных в PC.

Реализованный интерфейс ПО сделал работу оператора более комфортной в полевых условиях, что повысило производительность сейсмических исследований.

Практическая значимость работы

В результате внедрения разработанных аппаратных и программных модулей в «Регистр», будет получено новое оборудование: прибор для решения широкого спектра прикладных задач:

1. Регистрация сейсмических сигналов для решения задач инженерной геофизики (функционал базовой модели «Регистр»).
2. Оперативное изучение сейсмодинамических характеристик любых строительных объектов и наземных участков ВЧР в рамках неразрушающего контроля состояния зданий и сооружений, применяя в качестве источника сигнала – микросейсмический шум.
3. Более эффективное использование в сейсмологических исследованиях.

Обоснованность результатов подтверждается сравнительным анализом результатов измерений аналогичных приборов. Координаты и точное всемирное время было измерено встроенным GPS модулем и сертифицированным GPS-

приемником Garmin. Проведен сравнительный анализ результатов измерения сейсмодинамических характеристик на зарубежном оборудовании (американский регистратор «REFTEK») и на аппаратно-программном комплексе отечественного производства («Регистр»).

Правильность использования внешней карты памяти подтверждается безошибочной инициализацией компьютером и стабильным обменом данными в паре карта памяти и PC.

Защищаемые положения

1. Разработаны аппаратные модули для полевой микроконтроллерной аппаратуры оперативного сейсмодинамического контроля, обеспечивающие высококачественные параметры хранения, передачи данных в компьютер, временной привязки и автоматического позиционирования точки установки прибора.

2. Разработаны программные модули первичной обработки сейсмических сигналов и оперативного расчета сейсмодинамических параметров, включающих резонансную частоту колебаний, амплитуды смещения, декремент затухания.

Личный вклад автора присутствует на всех этапах работы.

Над решением поставленных задач работала группа из трех сотрудников лаборатории сейсмометрии: Л.Н. Сенин, методология и консультирование в области аппаратной разработки, Т.Е. Сенина, методология и консультирование в области программной разработки, и автор, непосредственно практическая реализация поставленных задач: разработка принципиальных электрических схем, разводка и изготовление печатных плат, распайка и размещение элементов на печатных платах, программная настройка работы микроконтроллера, «прошивка» и отладка программы микроконтроллера, написание программного кода для визуального интерфейса вычисления сейсмодинамических характеристик, а также непосредственное участие в полевых работах.

Апробация

Результаты диссертационной работы были доложены на заседании ученого совета ИГФ УРО РАН. А также на двух конференциях:

- XV Всероссийская научно-практическая конференция по теме: «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Москва. 13-14 октября 2016 г.;

- научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития». Москва. 9-10 ноября 2016 г.

Применены на практике в полевых работах:

- в рамках хоздоговора по проведению сейсмического микрорайонирования на территории завода «Тольятти-Азот», г. Тольятти, 2016 год. Измерение и расчет резонансной составляющей приращения сейсмичности;

- в рамках хоздоговора по обследованию башни отработанных газов на территории «Первоуральского новотрубного завода», г. Первоуральск, 2012 год. Измерение и изучение сейсмодинамических характеристик.

«Регистр» был представлен на выставках в ЭКСПО «ИННОПРОМ 2011», «ИННОПРОМ 2012», г. Екатеринбург, 2011-2012 гг.

Публикации

По теме диссертации опубликовано шесть работ в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD».

Структура работы: введение, четыре главы, заключение, 50 рисунков, 14 таблиц. Объем работы 103 страницы. Список литературы включает 72 источника.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю диссертационной работы – член-корр. РАЕ, доктору технических наук Л.Н. Сенину за постановку темы исследований, общее руководство и всестороннюю помощь.

Автор также благодарит сотрудников лаборатории сейсмометрии Института геофизики УрО РАН Т.Е. Сенину и Г.И. Парыгина за постоянную поддержку и творческое участие в решении многих вопросов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Приборы для измерения и изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред.

Известно, что любые здания и сооружения, являясь объектами антропогенной среды, со временем разрушаются в процессе эксплуатации. Чтобы своевременно диагностировать и предупредить необратимые процессы, необходимо проводить периодические наблюдения за объектом (мониторинг). Динамический мониторинг — важная составляющая общего мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

В соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 общий мониторинг проводится раз в два года. Порядок измерения динамических характеристик (расчет частоты собственных колебаний, максимальной и средней амплитуды смещений, скорости, ускорения и декремента затухания) и требования к оборудованию прописаны в ГОСТ Р 54859—2011. Если считать эталонными значения, полученные при паспортизации здания, то разница между показаниями, спустя два года после ввода его в эксплуатацию, и эталонными более, чем на 10%, говорит о наличии дефектов и является причиной для проведения комплексного обследования здания.

Можно выделить два основных направления исследования динамических характеристик сооружений: исследование отклика конструкции сооружения на специально наведенное внешнее воздействие (Есенина Н.А. и др. 1999 г.) и исследование колебательных процессов в сооружении при естественных воздействиях – микросейсмический шум. В случае естественных слабых воздействий

требуется специальная аппаратура, способная регистрировать такие динамические процессы (Аранович З.И. 1975 г.).

В главе 1 приведено подробное описание технических характеристик, а также сравнительный анализ функционала четыре различных приборов (российского и американского производства) с целью определения возможности использования каждого из них для измерения и изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ рассмотренных приборов.

	Стрела-П	Дельта-03	REFTEK DAS-130	Регистр-3MS
Аппаратная часть	да	да	да	да
Программное обеспечение	да	нет	нет	нет
Методика	да	нет	нет	да
Удобство и оперативность полевых работ	нет	нет	нет	да
Потребляемая мощность, Вт	>2,5	>2,5	>2,5	0,36
Количество рабочих смен от комплекта аккумуляторов без подзарядки	1-2	1-3	1-3	15
Наличие съемного диска	да	да	да	нет
Наличие GPS	нет	да	да	нет
Вес комплекса, включая аккумуляторы, датчики и соединительные провода, кг	>100	>20	>20	6,5

После проведения сравнительного анализа, обобщенно приведенного в таблице 1, в качестве базовой модели для разработки аппаратно-программного комплекса с целью изучения сейсмодинамических характеристик был выбран «Регистр-3MS».

При доработке и внедрении изменений в аппаратную часть «Регистра» были учтены основные недостатки прототипа и аналогичных приборов, а именно: включен в состав прибора GPS модуль; реализована возможность записи информации на

съемный элемент памяти; изменен АЦП и управляющий контроллер. При доработке программной части использована изначальная программа предварительной обработки. Разработаны отдельные модули ПО, позволяющие оперативно рассчитать требуемые величины сейсмодинамических характеристик. При внесении изменений в «Регистр-3MS» были учтены преимущества прибора: низкая потребляемая мощность, габариты. После внедрения аппаратных и программных разработок, описанных в работе, в базовую модель «Регистр», в результате будет получен новый прибор «Регистр-3MSD», превосходящий аналоги по техническим, программным и методическим характеристикам (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ приборов для изучения динамических характеристик.

	Стрела-П	Дельта-03	REFTEK DAS-130	Регистр-3MS	**Регистр-3MSD**
Число каналов	15	3	6	3	**3**
Разрядность АЦП	24	24	24	16	**24**
Емкость диска, Гб	2	2	16	0,012	**16**
Мощность потребления, Вт	2,5	2,5	2,4	0,36	**0,5**
Масса, кг	>100	>20	>20	6,5	**6,5**
Наличие GPS	-	+	+	-	+

Выводы главы 1

1. Проведен обзор работ, выполненных российскими и зарубежными исследователями на тему обследования зданий и сооружений. Выделены два основных направления исследования динамических характеристик сооружений: исследование отклика конструкции сооружения на специально наведенное внешнее воздействие и исследование колебательных процессов в сооружении при естественных воздействиях – микросейсмический шум.
2. Проведен сравнительный анализ приборов и технических средств, предназначенных для изучения динамических характеристик объектов.

Выделены преимущества и недостатки аналогичных приборов по сравнению с базовой версией «Регистр».

3. Для получения возможности оперативного измерения и изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред в базовую модель регистратора сейсмических сигналов «Регистр» необходимо внести следующие изменения:

- Встроить в «Регистр» GPS модуль.
- Исследовать возможности увеличения скорости обмена данными между регистратором и персональным компьютером.
- Внедрить в регистратор съемную карту памяти.
- Написать программу для вычисления сейсмодинамических характеристик.

Глава 2. Новые аппаратные модули «Регистр».

В процессе проведения работ по повышению производительности труда оператора регистратора сейсмических сигналов «Регистр» в прибор были внесены значительные функциональные изменения (введение модуля GPS, внешней карты памяти SDHC, а также USB моста FTDI-245), что позволило сократить количество носимого оборудования при полевых работах, увеличило продолжительность автономной работы и скорость обмена данными с PC (рисунок 1).

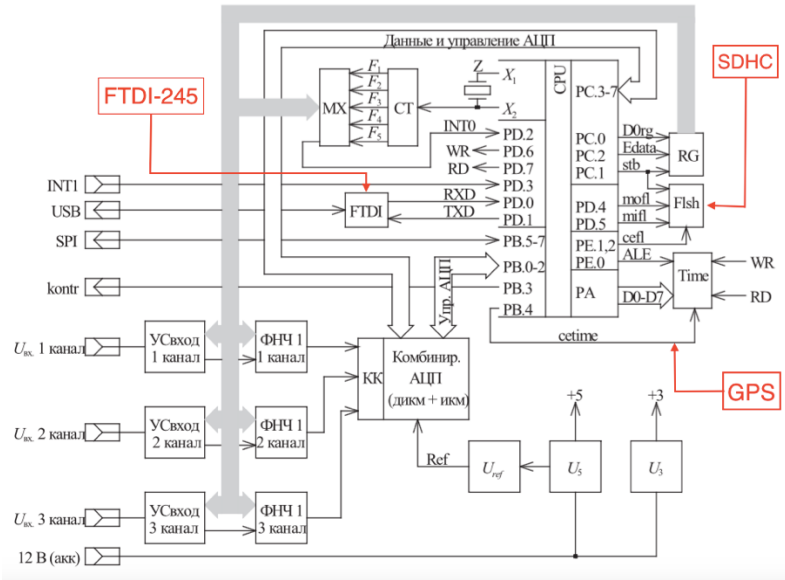

Рисунок 1. Структурная схема регистратора сейсмических сигналов «Регистр» с внесенными изменениями и дополнениями (красного цвета).

Во второй главе подробно описан процесс выбора GPS модуля L10 для решения задачи определения координат местоположения прибора и точного всемирного времени. Одна из основных и сложных задач внедрения нового модуля в существующую систему – это разработка принципиальной электрической схемы. Следующий шаг – это изготовление печатной платы (рисунок 2) и программная отладка работы модуля. В диссертационной работе описан алгоритм работы программы получения информации от L10 и приведен ее листинг. После получения информации от GPS модуля, следует обработка сообщения и получения искомой информации (координаты и точное всемирное время).

После подключения указанной выше платы к персональному компьютеру были проведены испытания работоспособности выбранного GPS модуля. Внешний вид интерфейса программы, использованной для тестирования L10, приведен на рисунке 3. Номера спутников отмечены различными цветами. Серый цвет означает, что спутник не задействован в расчетах; синий – данный спутник используется только для определения координат; зеленый – спутник участвует в вычислении координат, а также для определения точного всемирного времени. В нижней части рисунка приведен пример передаваемых сообщений со спутника. Для определения точного всемирного времени и координат точки установки оборудования используется сообщение $GPRMC.

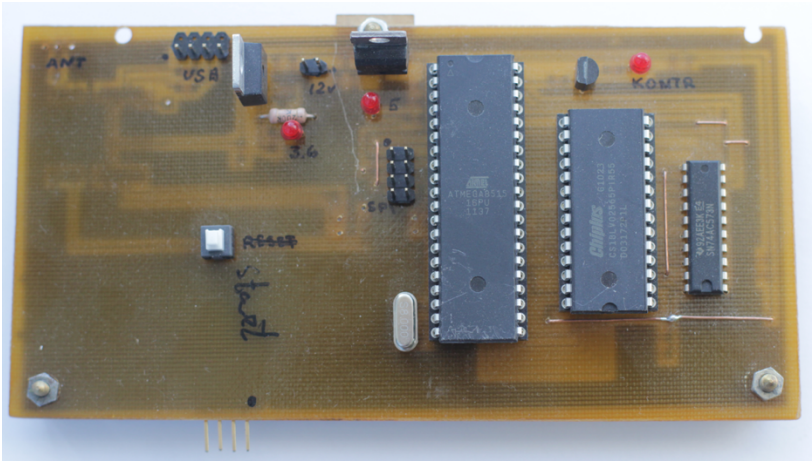

Рисунок 2. Печатная плата включения L10.

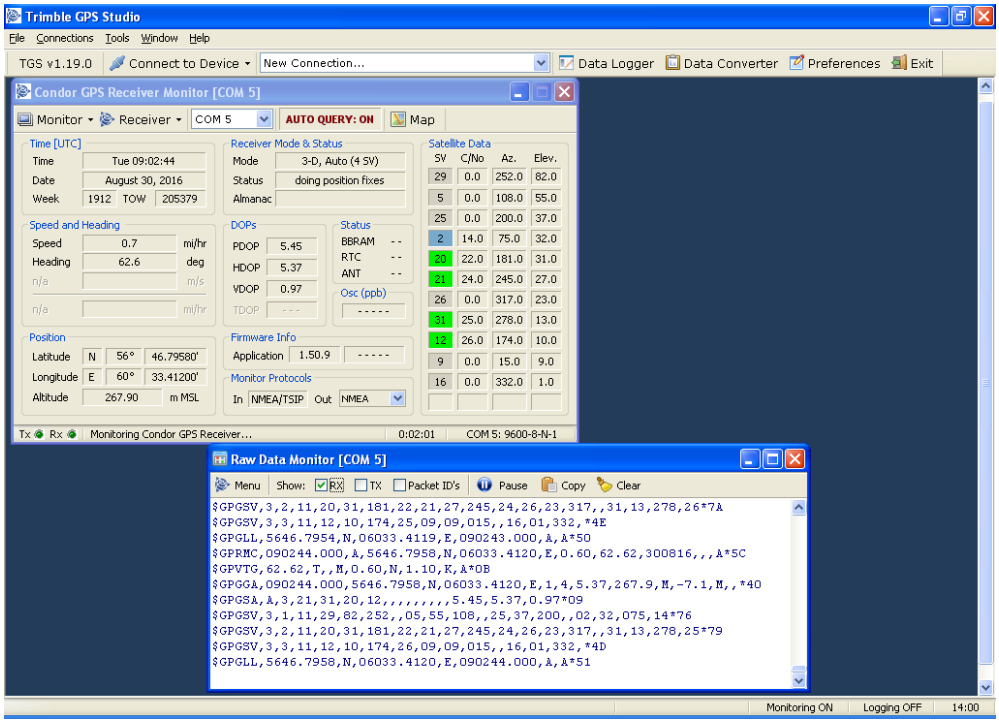

Рисунок 3. Интерфейс GPS-программы. Сообщения со спутника.

Следующие разработанные модули, рассматриваемые в работе – это переходник FTDI245 и встроенная карта памяти SDHC.

Следует отметить, что модуль хранения данных в базовой модели «Регистр» был реализован на встроенной Flash-памяти, объемом 8 Мб, которой хватало для непрерывной записи в течение 5-7 суток. С расширением области решаемых задач стало актуальным увеличение объема памяти данных регистратора. Это возможно за счет дополнительных модулей встроенной Flash-памяти или реализации записи сейсмической информации на съемный внешний носитель.

На первом этапе был рассмотрен вариант размещения на плате дополнительных встроенных элементов Flash-памяти, что влекло за собой увеличение передаваемых данных из регистратора в компьютер. Чтобы уменьшить время передачи данных, была поставлена и реализована задача увеличения скорости обмена данными между «Регистр» и PC, посредством микросхемы FTDI245. Она обеспечивает синхронный прием байта данных из внешнего устройства, в частности, считывание информации из порта «А» управляющего контроллера Atmega8515, упорядочивание принятых байт в буферном устройстве, формирование банка данных в соответствии с протоколом USB и передачу этих данных в одноименный порт компьютера. В связи

с тем, что работа в данном случае происходит не с последовательным потоком одиночных бит информации, как реализовано в переходнике FT232BM (реализация в базовой модели регистратора), а с байтом данных в единицу времени, скорость обмена должна была возрасти, по меньшей мере, в 8 раз. На практике удалось получить скорость передачи данных в варианте использования USB моста FT245BL совместно с контроллером Atmega8515, равную 2,4 Мбод.

Во второй главе подробно описана разработка принципиальной электрической схемы макетной платы подключения USB моста FT245BL к управляющему микроконтроллеру регистратора сейсмических сигналов «Регистр», алгоритм чтения данных из Flash-диска регистратора и передачи массива в компьютер по каналу USB, а также изготовление печатной платы (рисунок 4).

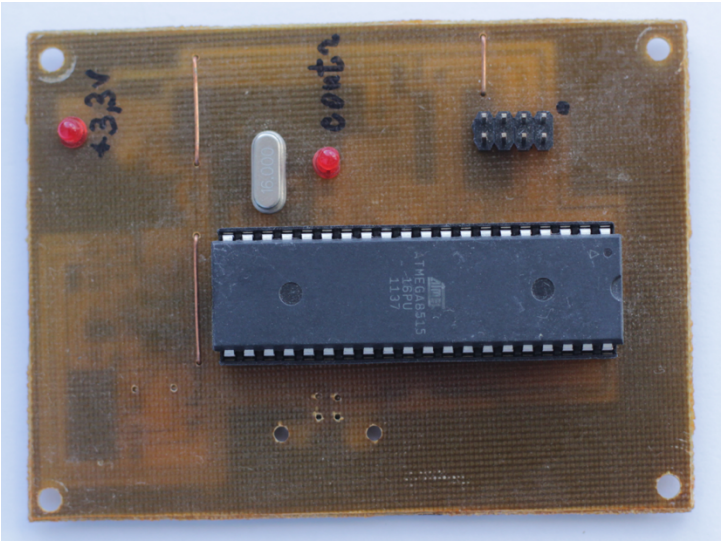

Рисунок 4. Печатная плата включения переходника FT245.

К моменту реализации поставленной задачи (увеличение скорости обмена данными с PC посредством USB моста) аналогичные приборы начали оперировать объемами данных в 1-2 Гб, что непременно привело к мысли об усовершенствовании процесса обмена данными регистратора сейсмических сигналов «Регистр» с персональным компьютером, а именно об использовании SDHC карты.

В работе приведена принципиальная электрическая схема отладочного модуля, в котором осуществляется операция записи - чтения цифровых данных на SDHC карту памяти в формате FAT32. Данный формат распространяется на карты SD в

модификации SDHC (Secure Digital High Capacity – цифровая память увеличенной емкости). Стандартный объем памяти таких карт может меняться в диапазоне 4 – 32 Гбайт.

Также представлена блок-схема фрагмента ПО, обеспечивающего работу SDHC карты в составе сейсмического регистратора «Регистр» и фрагмент программы контроллера на языке C++, который осуществляет стартовую инициализацию SDHC карты памяти. Разработана макетная отладочная плата включения SDHC карты. Внешний вид печатной платы показан на рисунке 5.

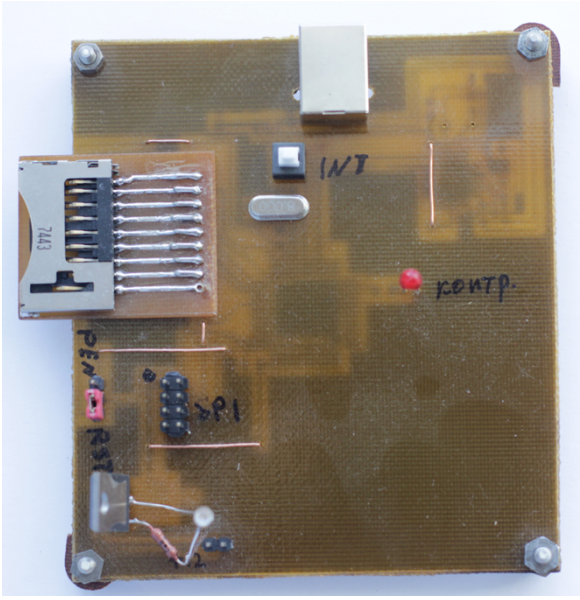

Рисунок 5. Печатная плата включения SDHC карты.

Ранее упоминалось, что в базовой версии «Регистр» в качестве управляющего контроллера использовался Atmega8515. В тексте работы подробно описаны причины выбора микроконтроллера серии Atmega компании Atmel. Одним из самых важных определяющих факторов выбора послужило соотношение производительность/энергопотребление, проиллюстрировано на рисунке 6.

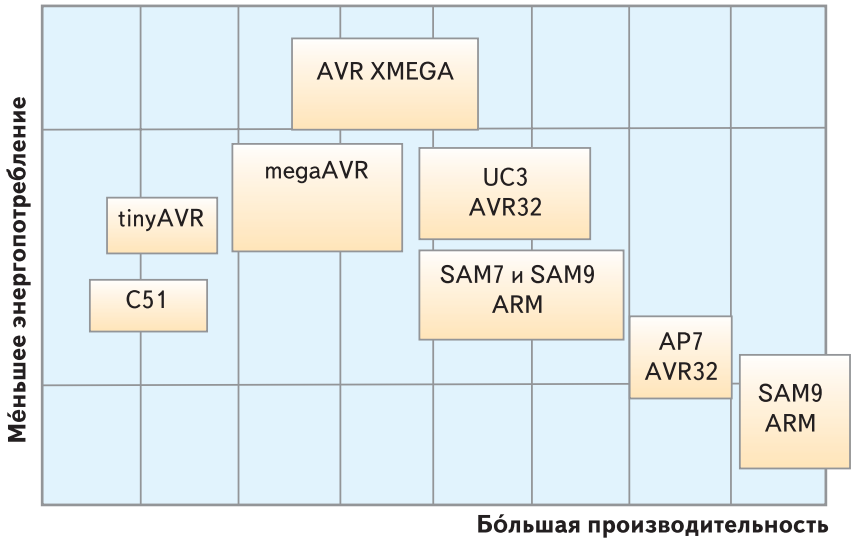

Рисунок 6. Спектр предлагаемых микроконтроллеров корпорации Atmel.

Выполняя поставленные задачи, расширяя функционал регистратора сейсмических сигналов «Регистр», добавляя все новые модули в базовую модель, возникла необходимость замены управляющего микроконтроллера.

Благодаря преемственности МК AVR, каждый последующий микроконтроллер программно-совместим с предыдущими версиями. Таким образом, выбор следующего в своей серии контроллера Atmega64 очевиден. Сравнивая технические характеристики с Atmega8515, видим качественное улучшение в увеличении памяти программ и памяти данных (таблица 3). И самое важное в нашем частном конкретном случае – это существенное увеличение количества программируемых портов ввода/вывода данных, что позволяет подключать дополнительные периферийные модули, такие как GPS и внешнюю карту памяти.

Таблица 3. Сравнение МК Atmega 64-й серии и 8515.

Название	**Flash**	**EEPROM**	**SRAM**	**I/O**
Atmega8515	8K	512	512	35
Atmega64	64K	2K	4K	53

Выводы главы 2

1. Заменен управляющий контроллер с Atmega8515 на Atmega64, что позволило реализовать расширенный функционал регистратора.
2. На уровне макетной платы отлажен механизм работы GPS-модуля L10 для определения координат и точного всемирного времени.
3. Разработан механизм обмена данными регистратора с компьютером посредством USB моста FT245. Увеличена скорость передачи данных в десять раз.
4. Реализован механизм записи и долговременного хранения большого объема данных, посредством введения в систему SDHC карты.

Результаты исследований, описанные во второй главе, обосновывают первое защищаемое положение.

Глава 3. Новые программные модули «Регистр».

В предыдущих главах работы было показано, что регистратор сейсмических сигналов «Регистр» может быть использован для решения задачи измерения и изучения динамических характеристик объектов и сред.

Для увеличения производительности и повышения комфорта оператора были проведены качественные аппаратные изменения прибора. Кроме реализации аппаратных модулей регистратора, для решения указанной задачи требуется разработать программные модули, позволяющие вычислять динамические характеристики, а также внести изменения в программный код пользовательского интерфейса, предназначенного для визуализации сейсмодинамических характеристик.

Просмотр сейсмограммы – этот режим и этот функционал является основным и очень важным при работе с сейсмическими данными. На текущий момент нет официально подтвержденных данных, опубликованных статей о том, что был реализован механизм стопроцентной автоматизированной обработки сейсмической информации. В любой задаче обработки сейсмограмм неизбежно присутствует этап ручной обработки данных оператором. И этот этап сопряжен с визуализацией сейсмических данных.

Отображение служебной информации отдельно взятой сейсмограммы помогает оператору, не открывая каждый файл, выбрать нужный.

На рисунке 7 приведен пример изображения фрагмента сейсмограммы в рабочем окне программы. Применив полосовой фильтр, оператор может анализировать фрагмент сейсмограммы без помех (рисунок 8). Помехами в данном случае называем любые колебания, выходящие за пределы используемого полосового фильтра.

Непосредственно в рабочем окне программы есть возможность рассчитать амплитуду смещения. Для этого одним кликом правой кнопки мыши выбираются два соседних экстремума (минимальный и максимальный), каждый отдельным кликом. В специально отведенном окне над панелью фильтров помещается результат вычисления амплитуды смещения и скорости смещения. Если вручную на каждом канале отдельно выбрать максимальные отклонения амплитуды, то программа произведет расчет максимального смещения. Отдельно отметим, что максимальная амплитуда смещения будет на частоте f_0 – на частоте собственных колебаний объекта.

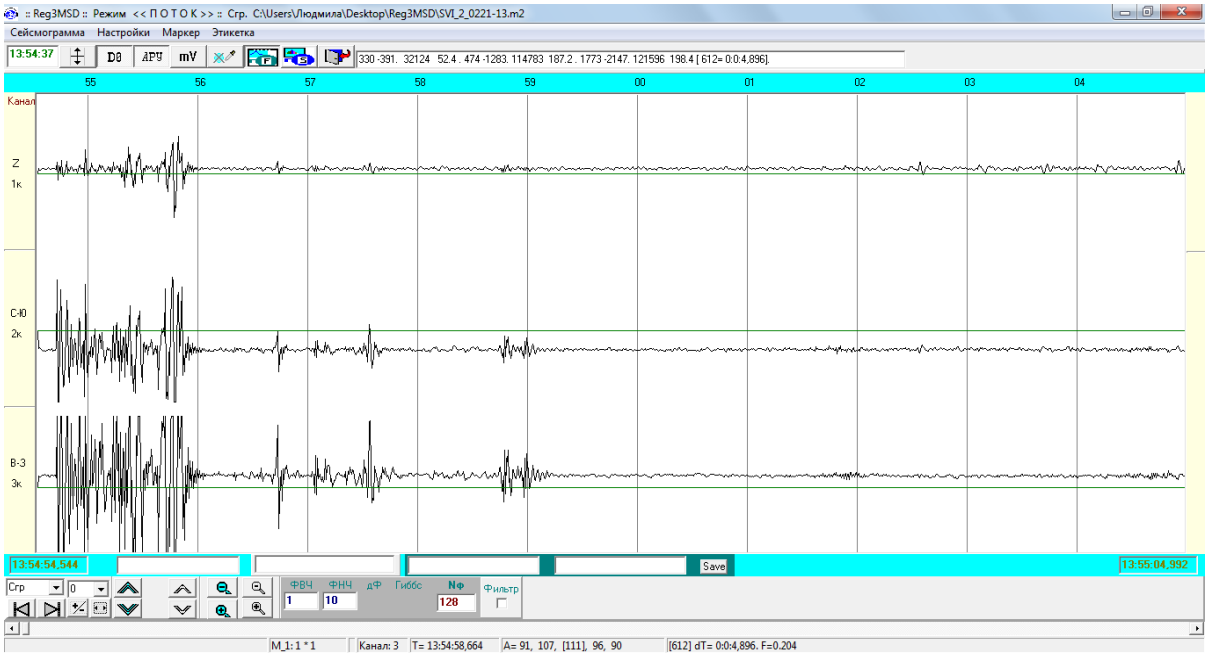

Рисунок 7. Фрагмент сейсмограммы.

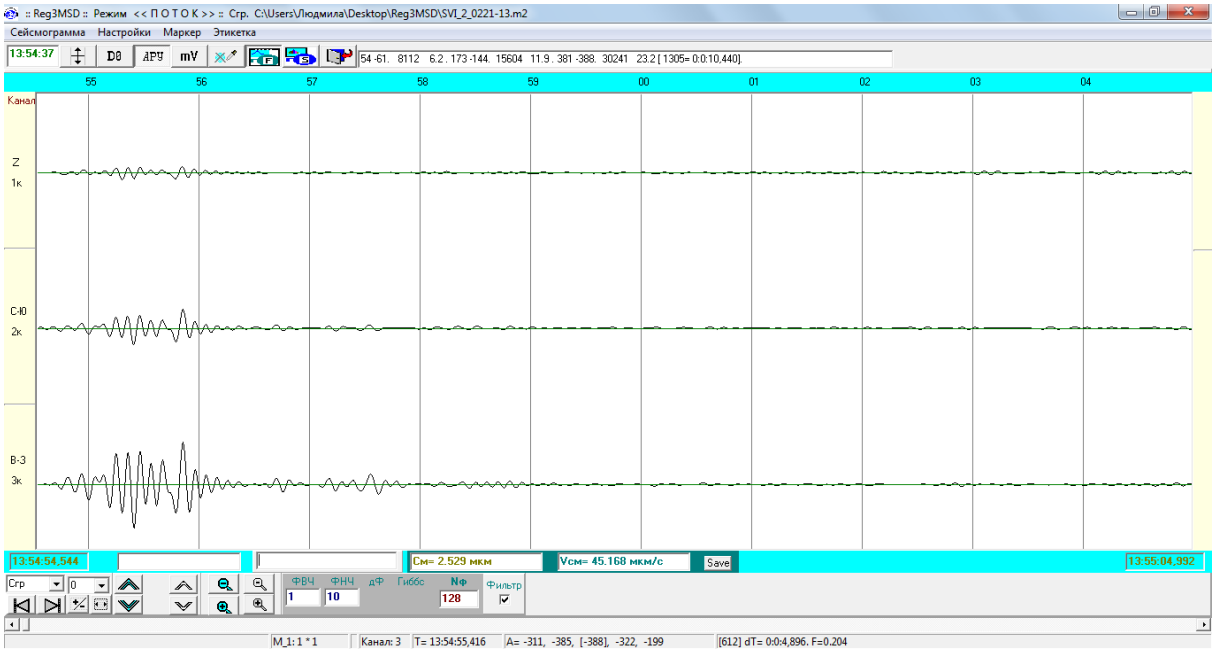

Рисунок 8. Фрагмент сейсмограммы после применения фильтра.

Применив полосовой фильтр на конкретной частоте к фрагменту сейсмической записи, получим точку на амплитудно-частотном спектре. Рассчитывая спектр в конкретном частотном окне, выберем удобный нам шаг по частоте. Чем меньше шаг по частоте выбираем, тем более сглаженным будет спектр. Пример расчета спектра приведен на рисунке 9.

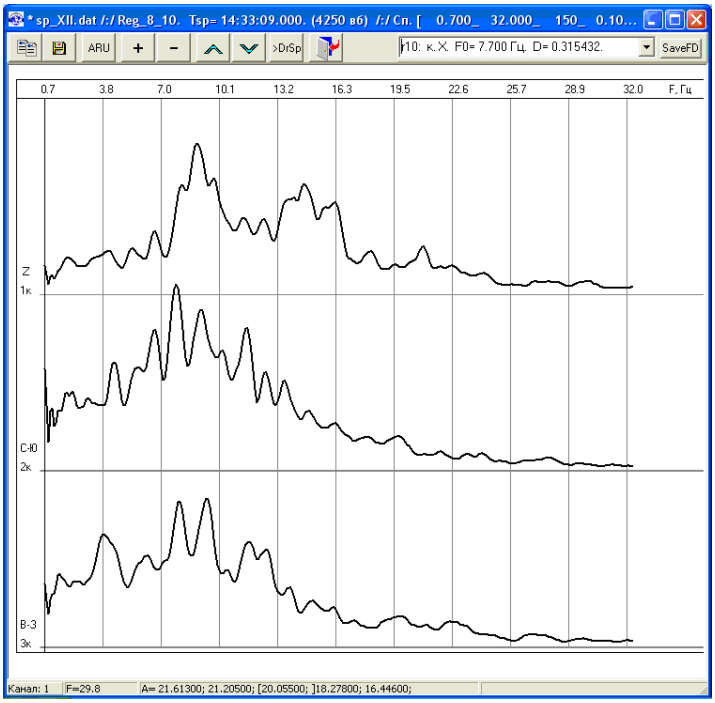

Рисунок 9. Спектр фрагмента сейсмической записи.

В правом верхнем углу рисунке 9 показаны вычисленные значения частоты собственных колебаний f_0 и декремента D. В окошке указано, что расчеты относятся к каналу X (С-Ю). Частота f_0 соответствует частоте собственных колебаний объекта, она определяется по максимальному значению амплитуды на АЧХ.

Физический смысл декремента D состоит в том, что это величина, обратная числу колебаний, по истечении которых амплитуда убывает в е раз. Например, если D=0,01, то амплитуда уменьшится в е раз после 100 колебаний.

Программа обработки сейсмической информации, включающая в себя вычисление сейсмодинамических характеристик, была зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности 27 июля 2016 года.

Выводы главы 3

Разработаны программные модули первичной обработки сейсмических сигналов и оперативного расчета сейсмодинамических параметров, включающих резонансную частоту колебаний, амплитуду смещения, декремент затухания.

Разработанные программные модули были написаны прежде всего для того, чтобы дополнить функционал аппаратно-программного комплекса «Регистр», с целью расширения области применения прибора, а именно: использовать для вычисления сейсмодинамических характеристик объектов. А также с тем, чтобы оператор во время полевых работ мог оперативно оценить правильность выбора точки наблюдения.

Результаты исследований, описанные в третьей главе, обосновывают второе защищаемое положение.

Глава 4. Примеры использования разработанных аппаратных и программных модулей «Регистр».

Результаты проделанной работы применялись на практике в рамках решения задач, выполняемых регистратором сейсмических сигналов «Регистр». Таковыми являются измерение и вычисление сейсмодинамических характеристик зданий (сооружений), а также исследование наземных участков верхней части геологического разреза.

В четвертой главе приведены подробные выкладки расчетов частоты собственных колебаний и декремента при обследовании промышленного объекта. А также расчет резонансных свойств грунта при проведении сейсмического микрорайонирования.

Инструментальная часть сейсмического микрорайонирования методом сейсмических жесткостей – это профильные сейсмические исследования методом преломленных волн с искусственным возбуждением упругих колебаний. Для регистрации колебаний используется инженерная малоканальная станция «Синус», разработанная в лаборатории сейсмометрии ИГФ УрО РАН. Результатом работ СМР является карта приращения сейсмичности относительно карт ОСР-97.

Оценка приращений сейсмической интенсивности методом сейсмических жесткостей проводится путем сравнения значений сейсмических жесткостей изучаемых и средних (эталонных) грунтов с учетом влияния обводненности разреза и возможных резонансных явлений (1):

$$\Delta J = \Delta J_с + \Delta J_в + \Delta J_{рез} \qquad (1)$$

где $\Delta J_с$ – приращение сейсмической интенсивности за счет различия сейсмической жесткости грунтов на изучаемом и эталонном участках;

$\Delta J_в$ – приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов на изучаемом участке при обводнении;

$\Delta J_{рез}$ – приращение сейсмической интенсивности за счет возможного возникновения резонансных явлений при резком различии сейсмических жесткостей в покрывающей и подстилающей толще пород изучаемого разреза.

Для вычисления составляющей $\Delta J_{рез}$ требуется измерить и вычислить f_0 – резонансную частоту колебаний на данном участке. Именно для этого используется регистратор сейсмических сигналов «Регистр». Методика измерений предполагает непрерывную запись фонового шума в исследуемой точке на протяжении 15-20 минут.

Проведя измерения и вычислив f_0 и декремент затухания, по таблице 4, выбираем значение коэффициента динамичности.

Таблица 4. Табличные значения коэффициента динамичности β.

Период **колебаний, с**	Коэффициент динамичности β для логарифмических декрементов колебаний δ						
	1,26	0,63	0,44	0,31	0,25	0,12	0,03
0,03	1	1	1	1	1	1	1
0,100	1,75	2,35	2,82	3,20	3,52	4,48	5,86
0,600	1,75	2,35	2,82	3,20	3,52	4,48	5,86
4,000	0,43	0,58	0,68	0,79	0,87	1,1	1,45

Для вычисления приращения сейсмичности за счет резонансных свойств грунта используем формулу (2):

$$\Delta J_{рез}\ (балл) = 2{,}5\lg\beta - 0{,}75 \qquad (2)$$

При $\beta = 2$, $\Delta J_{рез} = 0$; при $\beta = 4$, $\Delta J_{рез} = 0{,}75$; при $\beta = 6$, $\Delta J_{рез} = 1{,}2$ балла.

Результатом приведенных выше расчетов является приращение сейсмичности ΔJ с учетом резонансной составляющей ($\Delta J_{рез}$). Если базовая сейсмичность, согласно карте ОСР-97 на исследуемом участке, например, равна 6 баллов, то результаты СМР могут либо подтвердить 6 баллов (при $\Delta J < 0{,}5$), либо увеличить значение до 7 баллов (при $\Delta J \geq 0{,}5$), что может повлиять на проектные и строительные работы.

Для подтверждения достоверности получаемых данных (при работе с «Регистр») было проведено контрольное обследование здания института геофизики УрО РАН (г. Екатеринбург, ул. Амундсена 100) двумя различными регистраторами. Первый – это «Регистр» в комплекте с трехкомпонентным велосиметром СК-1П (отечественного производства). Второй – «REFTEK DAS-130» американского производства, в комплекте с датчиком СК-1П. Внешний вид здания и расположение пунктов наблюдения приведены на рисунке 10. Методика измерения – одинаковая: размещение датчиков, как показано на рисунке, продолжительность съемки – 15 минут. Расчеты сейсмодинамических характеристик проведены на программном обеспечении, реализованном в рамках данной работы. Допустим, что сертифицированный прибор (REFTEK) работает без сбоев и информация, зарегистрированная с его помощью, достоверна. Тогда при всех одинаковых условиях результат расчета сейсмодинамических характеристик должен совпадать.

В измерениях и расчетах присутствуют обозначения осей X, Y, Z. Поясним, что ось X направлена вдоль длинной стороны здания (С-Ю), Y – вдоль короткой (В-З), а ось Z – это вертикальная составляющая.

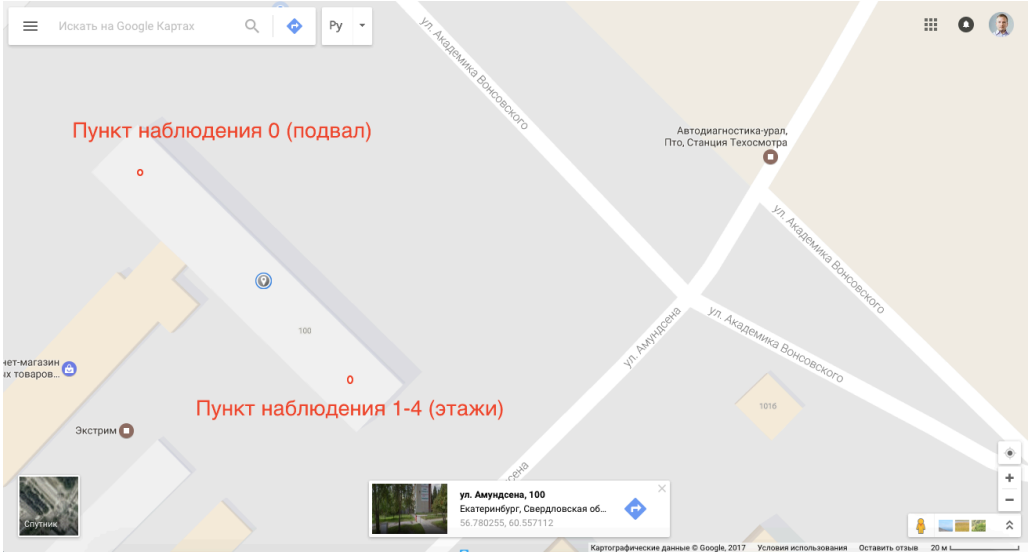

Рисунок 10. Расположение пунктов наблюдения и внешний вид здания

В таблице 5 приведены расчеты частоты собственных колебаний и декремента затухания, измеренных прибором «Регистр». В таблице 6 – прибором «REFTEK».

На рисунке 11 и 12 показаны фрагменты сейсмограммы, записанные аппаратно-программными комплексами «Регистром» и «REFTEK» в одно и то же время. На рисунке 13 и 14 рассчитаны соответствующие спектры приведенных ранее фрагментов. При расчете спектра использовались следующие параметры: полосовой фильтр 1-32 Гц, шаг 0,1 Гц, количество точек в преобразовании Фурье 128, длительность фрагмента приблизительно 13000 отсчетов (или 1 минута 45 секунд).

Обратим внимание на то, что значения, полученные обоими регистраторами, отличаются друг от друга менее, чем на 5%. Спектры имеют схожую форму. Отличия в полученных результатах могут быть вызваны различиями конструктивных особенностей приборов, контактов разъемов, а также получены в процессе программной обработки и приведения сейсмограмм к единому формату.

Таблица 5. Данные с «Регистр»

	f_0, Гц			d		
Этаж	X	Y	Z	X	Y	Z
0	16,5	16,4	16,4	0,43	0,28	0,13
1	10,2	10	17,9	0,78	1,19	0,15
2	2,8	2,4	17,9	2,19	0,74	0,15
3	4,2	2,3	16,3	0,87	0,83	0,17
4	4,1	2,3	15,2	0,92	0,79	0,51

Таблица 6. Данные с «REFTEK»

	f_0, Гц			d		
Этаж	X	Y	Z	X	Y	Z
0	16,4	16,3	16,3	0,44	0,42	0,13
1	10,2	10	17,9	0,79	1,18	0,15
2	2,8	2,4	17,8	2,15	0,76	0,15
3	4,1	2,3	16,2	0,88	0,83	0,17
4	3,5	2,3	15,1	1.03	0,76	0,55

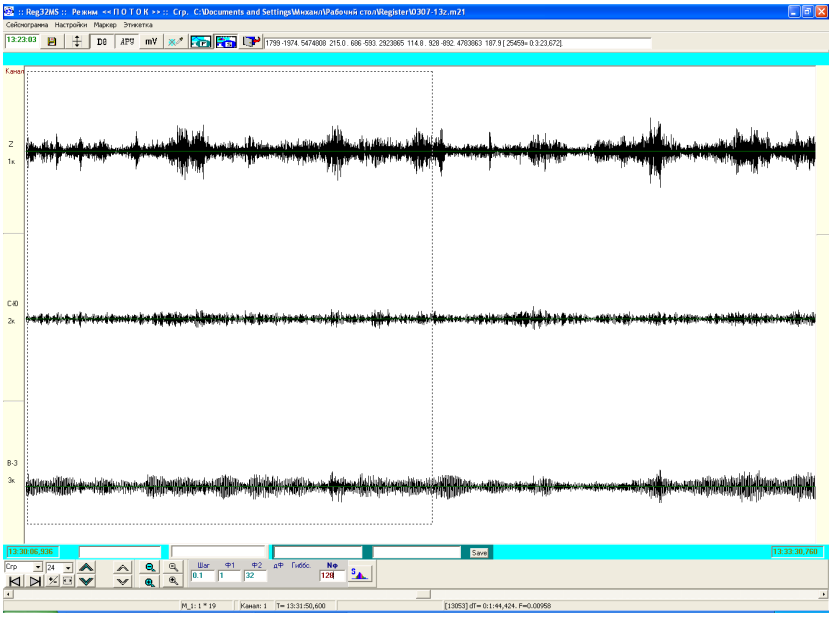

Рисунок 11. Фрагмент сейсмограммы, записанной на «Регистр»

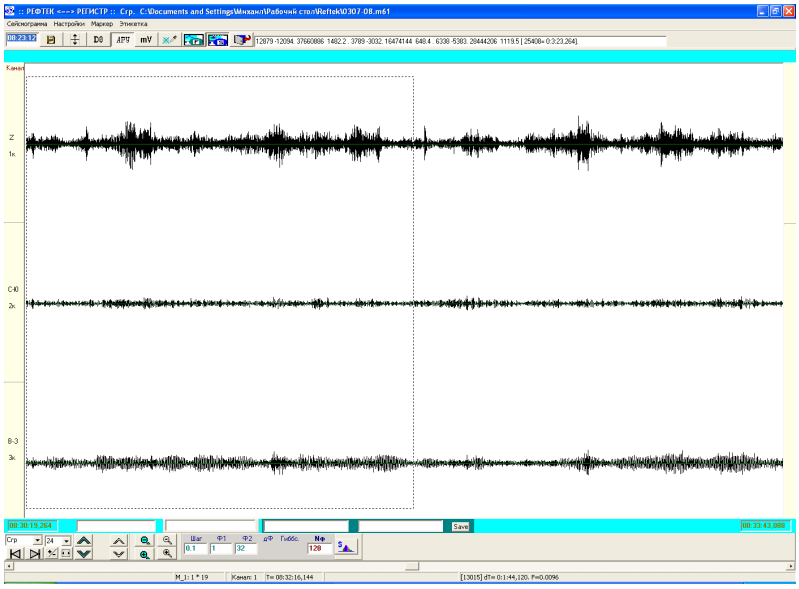

Рисунок 12. Фрагмент сейсмограммы, записанной на «REFTEK»

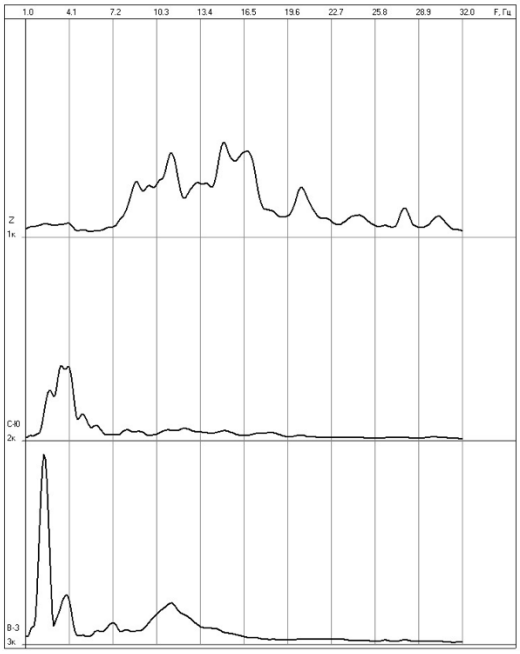

Рисунок 13. Рассчитанный спектр фрагмента сейсмограммы («REFTEK»)

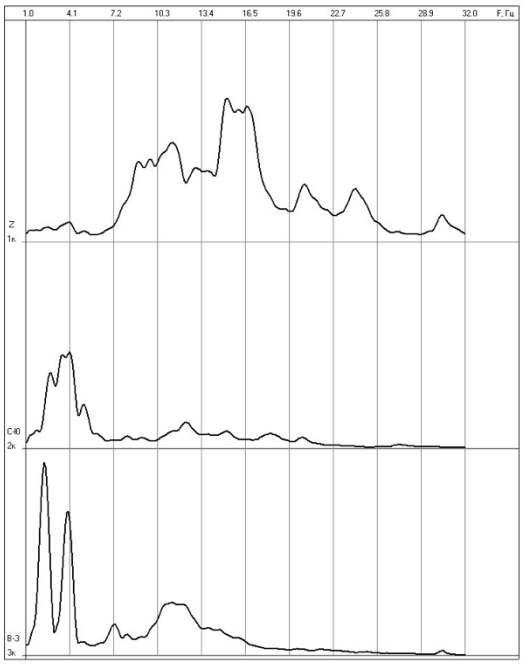

Рисунок 14. Рассчитанный спектр фрагмента сейсмограммы («Регистр»)

Выводы главы 4

1. Применение аппаратно-программного комплекса «Регистр» непосредственно связано с современными требованиями обеспечения безопасности общества. Разработанные функциональные узлы оборудования помогут решать инженерные геофизические задачи, направленные на предотвращение разрушения объекта (в соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011: «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния»).
2. Анализируя результаты, полученные в сравнительном анализе «Регистр» - «REFTEK», можем сделать общий вывод о достоверности данных, полученных при помощи регистратора сейсмических сигналов «Регистр».

Заключение.

Во введении были сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения цели, поставленной автором в работе: разработка аппаратных и программных модулей регистратора сейсмических сигналов «Регистр» для изучения сейсмодинамических характеристик любых строительных объектов, гражданского

или промышленного назначения, а также наземных участков верхней части геологического разреза.

Более подробно перечислим итоги по каждой из поставленных задач.

1. Проведен сравнительный анализ приборов, специально предназначенных или имеющих возможности для измерения и изучения сейсмодинамических характеристик. Определены конкретные функциональные узлы «Регистра», подлежащие изменению: блок хранения данных и передачи в PC, GPS модуль.
2. Разработана макетная отладочная плата встроенного GPS модуля под управлением микроконтроллера Atmega8515. Настроена работа GPS. При введение данного модуля в «Регистр» решается вопрос определения координат позиционирования прибора и установки точного всемирного времени.
3. Увеличена скорость обмена данными регистратора и персонального компьютера посредством переходника FT245. Использование указанного USB моста повышает скорость обмена данными в 10 раз по сравнению с предыдущей реализацией на переходнике FT232.
4. Разработана макетная отладочная плата для управления внешней картой памяти SDHC. Настроены процессы записи/чтения данных с карты. Применение этого узла в регистраторе позволяет более эффективно использовать прибор в сейсмологических наблюдениях за счет увеличения продолжительности записи данных с одной недели до нескольких месяцев.

Выводы 1-4 обосновывают первое защищаемое положение.

5. Разработаны программные модули, вычисляющие сейсмодинамические характеристики, такие, как: резонансная частота колебаний, амплитуда смещений, декремент затухания.

Вывод 5 обосновывает второе защищаемое положение.

6. Приведены примеры практического применения аппаратных и программных модулей на полевых работах для изучения сейсмодинамических характеристик: измерение сейсмодинамических характеристик на строительном объекте и на площадке при проведении СМР. А также проведен сравнительный анализ

работы и получаемых результатов сейсморегистрирующей системы «Регистр» и зарубежного аналога «REFTEK».

Поставленные задачи выполнены в полном объеме. Выбранные аппаратные и программные модули разработаны и готовы к внедрению в новую модификацию регистратора сейсмических сигналов «Регистр».

Делая общий вывод о применении разработанного оборудования, следует отметить практическую значимость данных, получаемых на полевых работах: в рамках ГОСТ 31937-2011 определение динамических параметров при паспортизации сооружения облегчает ведение мониторинга в процессе эксплуатации, а значит, своевременное устранение возникающих дефектов на ранней стадии разрушения строительного объекта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е., Воскресенский М. Н. Восьмиразрядный RISC-контроллер в системе управления автономного регистратора сейсмических сигналов «Регистр-3М». Промышленные АСУ и контроллеры № 9. М: Научтехлитиздат, 2011. С. 41 – 46.
2. Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Парыгин Г.И., Воскресенский М.Н. Исследование сейсмодинамических характеристик строительных объектов с использованием регистратора сейсмических сигналов «Регистр». Электронный журнал «Архитектон» № 38. ISSN 1990 – 4126, УралГАХА, 2012.
3. Сенин Л.Н., Воскресенский М.Н., Сенина Т.Е. Использование GPS модуля Quectel L10 в микроконтроллерном регистраторе сейсмических сигналов «Регистр». Промышленные АСУ и контроллеры № 5. М: Научтехлитиздат, 2014. С. 47 – 52.
4. Сенин Л. Н., Воскресенский М. Н., Сенина Т. Е. Аппаратно-программный модуль обмена данными с компьютером микроконтроллерного регистратора

сейсмических сигналов «Регистр». Промышленные АСУ и контроллеры № 2. М: Научтехлитиздат, 2015. С. 52 – 55.

5. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е., Воскресенский М. Н. 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь в полевой микроконтроллерной аппаратуре для сейсмических исследований. Промышленные АСУ и контроллеры № 7. М: Научтехлитиздат, 2015. С. 58 – 63.
6. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е., Воскресенский М. Н. Использование SDHC карты памяти в качестве накопителя сейсмической информации в микроконтроллерном сейсморегистрирующем приборе «Регистр». Промышленные АСУ и контроллеры № 4. М: Научтехлитиздат, 2016. С.50–55.

Свидетельство о гос. регистрации программы:

7. Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016618341 от 27 июля 2016 года: «Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD».