Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича
Уральского отделения Российской академии наук
(ИГФ УрО РАН)

На правах рукописи

Воскресенский Михаил Николаевич

Разработка аппаратных и программных модулей регистратора сейсмических сигналов «Регистр» для изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред.

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Научный руководитель:

Заведующий лабораторией сейсмометрии

ИГФ УрО РАН,

доктор технических наук

Сенин Лев Николаевич

г. Екатеринбург – 2017

Содержание

Введение 3
Глава 1. Приборы для измерения и изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред 9
Глава 2. Новые аппаратные модули «Регистр» 26
2.1. Управляющий контроллер 27
2.2. Модуль GPS 39
2.3. Расширенная память данных 55
Глава 3. Новые программные модули «Регистр» 72
Глава 4. Примеры использования разработанных аппаратных и программных модулей «Регистр» 81
Заключение 95
Список использованной литературы 97

Введение

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 выражено 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 с применением микросейсмического шума в качестве источника сигнала.

3. Повышение эффективности использования 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 - 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 пла-

тах, 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.

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 — представляет собой комплекс инженерно-геодезических работ, выполняемых с целью определения количественных характеристик деформационных процессов, в том числе колебаний зданий (Патрикеев А.В. Вестник МГСУ. 2013 г. №1). Объектами динамического мониторинга могут быть любые сооружения промышленного и гражданского назначения. В соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 общий мониторинг проводится раз в два года и начинается с выполнения визуального осмотра конструкций с целью обнаружения ярко выраженных дефектов, приблизительной оценки категории технического состояния, затем проведения измерения динамических параметров и составления паспорта здания (сооружения). 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 (ГОСТ Р 54859—2011). Данное утверждение проиллюстрировано на рисунке 1.1, где по оси абсцисс — время $T_Г$, год, а по оси ординат — обобщенная характеристика надежности здания или сооружения А. При разнице параметров менее 10% рекомендуется проведение повторного обследования через два года. При необходимости, в каждом конкретном случае обследование здания

можно начинать и раньше, но не позднее двух лет с момента ввода в эксплуатацию.

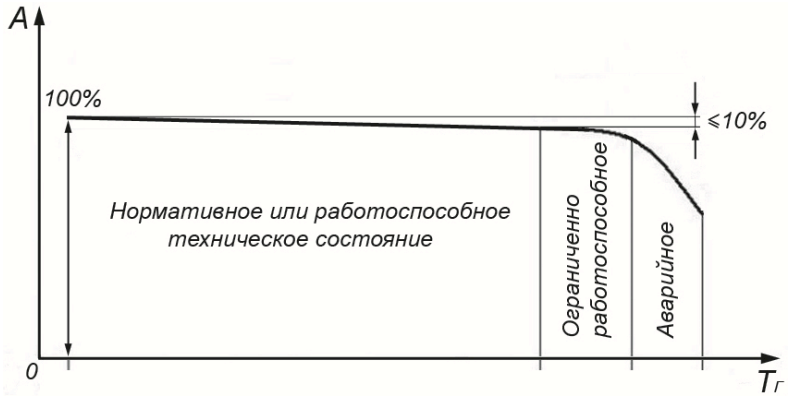

Рисунок 1.1. Изменение обобщенной характеристики надежности за период эксплуатации (Патрикеев А.В. Вестник МГСУ. 2013 г. №1)

По данным автора Salawu O.S. (Detection of structural damage through changes in frequency: a review // Engineering Structures. – 1997), уменьшение частоты собственных колебаний более, чем на 5% также может свидетельствовать о наличии повреждений конструкции. В соответствии с исследованиями Сычева О.В. в г. Иркутск (Сычев О.В., Нечаев Р.Ю., Ширкин Р.В. Исследование динамических характеристик зданий и сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности на опасном производственном объекте. / Международный научный журнал «Инновационная наука»), увеличение периода колебаний объекта, а значит уменьшение частоты собственных колебаний на 4-6% соответствует первой степени повреждения, на 20-25% - второй, на 40-60% - третьей степени повреждения (Голенецкий С.И. Землетрясения в Иркутске. – Иркутск: 1997, 92 с.).

Проводя мониторинговые исследования, необходимо соблюдать и повторять условия измерений из года в год (точка позиционирования приборов, время года, желательно месяц и время суток). Зарубежные исследователи (J.F. Clinton, C.S. Bradford, T.H. Heaton, J.Favella, N. Martins, E. Caetano, S. Diord, F. Magalhaes, A. Cunha, K.V. Yuen, S.C. Kuok) подробно описали в своих работах изменение динамических характеристик строительных объектов в зависимости от времени года и от температуры. В России подобными работами занимались Золотухин Е.П., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Короленко Д.Б., Нескородев В.Д.

Поскольку при динамическом мониторинге происходит периодическая регистрация и спектральный анализ колебаний в достаточно широком диапазоне частот, при этом может регистрироваться несколько колебательных процессов в различных элементах конструкции, то именно динамический мониторинг является наиболее информативным методом экспресс-диагностики, предшествующим, в случае выявления тенденции изменения контролируемых параметров, принятию решения о проведении комплексного обследования здания или сооружения.

Можно выделить два основных направления исследования динамических характеристик сооружений: исследование отклика конструкции сооружения на специально наведенное внешнее воздействие (Патент РФ 2141635 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 (Аппаратура и методика сейсмических наблюдений в СССР/ под ред. З.И. Аранович – М.: Наука, 1975. – 243с.). Естественные воздействия микросейсмического фона на сооружения продолжаются постоянно и благодаря этому можно организовать непрерывное наблюдение или мониторинг (Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте. В.В. Корепанов, Р.В. Цветков, Механика №2, 2014 г., с.154). В работах Юдахина Ф.Н., Капустян Н.К., Dalgleish W.A. представлены результаты измерений колебаний зданий, вызванных ветром.

В соответствии с ГОСТ Р 54859—2011, основными контролируемыми параметрами являются период основного тона собственных колебаний объекта и декремент затухания. Стандартизация метода определения значения этих параметров производится в соответствии с требованиями Федерального Закона (ФЗ РФ «О техническом регулировании» от 27.12.2002 №184-ФЗ), а также для обеспечения соблюдения требований технического регламента (Технический регламент о безопасности зданий и сооружений, введенный в действие ФЗ РФ от 30.12.2009 №384-ФЗ) и ГОСТ 31937-2011. Нормативная документация регламентирует методику изучения динамических характеристик зданий и сооружений. Для определе-

ния значений периода применяют косвенный метод измерений, при котором регистрируют процессы колебаний зданий по трем взаимно перпендикулярным осям. Значение периода по каждой из осей определяют по результатам измерений по соответствующей оси расчетным методом, основанном на анализе спектров мощности колебаний здания. Значение декремента по каждой из взаимно перпендикулярных осей определяют также расчетным методом по результатам измерений, проведенных для определения значений периода. Для определения значений периода, как правило, регистрируют собственные колебания здания, вызванные естественным динамическим природно-техногенным фоном города (микросейсмический шум), поэтому в процессе измерений дополнительных воздействий на здание не производят. Согласно данной методике, автором вместе с коллегами проведены работы при помощи регистратора сейсмических сигналов «Регистр» (Сенин Л.Н., Воскресенский М.Н. и др. Архитектон: известия вузов. № 38 / Июнь 2012 ISSN 1990-4126).

Записанный сигнал обрабатывается на компьютере специализированным программным обеспечением: рассчитывается амплитудно-частотный спектр сигнала. По максимуму спектра определяется частота собственных колебаний, т.е. величина, обратная периоду собственных колебаний. Физический смысл данного параметра состоит в том, что при внешнем воздействии на частоте собственных колебаний объекта будет наблюдаться явление резонанса, а значит и максимальные смещения, которые могут привести к разрушению здания.

Полученная информация об основном тоне колебаний изучаемого объекта дает основания для расчета чрезвычайно важного динамического параметра – декремента затухания (от латинского decrementum — уменьшение, убыль), количественная характеристика быстроты затухания колебаний.

Как известно, любая колебательная система с потерями при ее возбуждении совершает затухающие колебательные движения, описываемые по формуле:

$$Y(t) = A_0 e^{-\delta t} \sin(2\pi f t), \qquad (1.1)$$

где Y(t) – величина перемещения колеблющегося тела;

A_0 – начальная амплитуда колебаний; f – частота колебаний; δ – коэффициент затухания, физический смысл которого в том, что это величина, обратная времени, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в «е» раз. Однако коэффициент затухания не дает полного представления об интенсивности затухания, поэтому для характеристики интенсивности затухания ввели понятие декремента затухания d, который равен натуральному логарифму отношения двух последующих максимальных отклонений колеблющейся величины в одну и ту же сторону:

$$d = \ln A_n/A_{n+1}, \qquad (1.2)$$

где A_n и A_{n+1} – амплитудные значения функции Y(t) для двух ее последовательных экстремумов при затухании.

Физический смысл декремента 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.

Из (1.1) и (1.2) получаем связь коэффициента затухания и декремента:

$$d = \delta f_0 \ . \qquad (1.3)$$

Коэффициент затухания также связан с амплитудно-частотной характеристикой системы (АЧХ) формулой:

$$\delta = \pi\Delta f, \qquad (1.4)$$

где Δf – полоса пропускания колебательной системы на уровне 0,707 (-3 дБ) от максимума. Из соотношений (1.3) и (1.4) можно получить значение декремента затухания через АЧХ системы:

$$d = \pi\Delta f/ f_0 \qquad (1.5)$$

Таким образом, используя преобразование Фурье и соотношение (1.5), удается в условиях интенсивных промышленных помех рассчитать спектры колебательной системы, вычленить f_0 – наиболее вероятную частоту собственных колебаний и найти декремент затухания для каждого значения f_0.

Таковой колебательной системой можно рассматривать не только здания и сооружения, но также и конкретные участки на поверхности земли.

Если учесть, что любое здание или сооружение располагается на(в) земной поверхности, то будет правильно предположить наличие взаимного влияния верхней части геологического разреза (далее – ВЧР) и антропогенных объектов. Объектом изучения ВЧР в данном случае является сейсмичность конкретного участка поверхности земли, точнее – приращение сейсмической интенсивности относительно карт ОСР-97 (Медведев С.В. Сейсмическое микрорайонирование). Для расчета приращения сейсмической интенсивности необходимо проведение сейсмического микрорайонирования (далее – СМР). Методика проведения работ предполагает расчет $T_{рез}$, величины, обратно пропорциональной резонансной частоте, на которой наблюдается пиковое значение спектра.

Существует три метода проведения СМР:

1. Прямой – регистрация землетрясения на заданной площадке в большом количестве точек. Данный метод принято считать наиболее точным, но он является самым дорогостоящим. В некоторых случаях, когда период проведения СМР совпадает с афтершоковыми процессами крупных землетрясений, прямой метод становится существенно дешевле и используется, как основной (Field E.H., Jacob K.H.);
2. Косвенный – основан на изучении скоростных характеристик ВЧР и расчете усиления сейсмических колебаний землетрясений верхней частью геологического разреза. Именно исследование верхней части геологического разреза обеспечивает получение информации для математического моделирования сейсмических воздействий (расчета акселерограмм) (Уломов В.И., Штейнберг В.В.);
3. Микросейсмический – основан на существовании связей между интенсивностью микросейсмических колебаний и усилением колебаний от землетрясений на заданной площадке (Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А. и др. / Физическая мезомеханика 11 / (2008) с. 26-36).

Таким образом, изучая сейсмодинамические характеристики объектов, можно говорить в первую очередь об измерении частоты собственных колебаний как любых зданий и сооружений, так и участков поверхности ВЧР. Затем программно

вычисляются следующие параметры: (максимальные и средние значения) амплитуда смещения на полученной частоте, скорость, ускорение, декремент затухания. Указанные параметры используются при паспортизации зданий и сооружений, а также при проведении мониторинга. Частный случай использования опыта мониторинга при проектировании строительных объектов приводят авторы Капустян Н.К., Климов А.Н. и Антоновская Г.Н.

В соответствии с ГОСТ Р 54859—2011 п. 5 измерительная система должна состоять из двух подсистем: сбора данных; регистрации и обработки. Измерительная система должна успешно решать задачу изучения динамических характеристик: периода собственных колебаний и декремента затухания. Измерения должны проводиться по трем взаимно перпендикулярным осям.

Выполняя рекомендации, указанные в ГОСТ Р 53778-2010 (позднее заменен на ГОСТ 31937-2011), обследованием зданий и сооружений занимается большое количество специалистов. Исследователи из Санкт-Петербурга (Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В.) не только длительное время проводили работы по обследованию зданий и сооружений (с 1992 года), но даже пришли к выводу о недостаточности контролируемых параметров в методике, описанной в ГОСТ. В опубликованных ими работах предлагается контролировать также формы колебаний.

Каждый специалист использует свое оборудование. Например, исследователи из Красноярска (Волгин Г.А., Рожков А.Ф.) применяют систему регистрации Байкал-АСН8 в комплекте с трехкомпонентными акселерометрами А1638. При обследовании Олимпийских объектов (ледовый дворец «Большой», керлинговый центр «Ледяной куб», крытый конькобежный центр «Адлер-Арена», дворец зимнего спорта «Айсберг», ледовая арена «Шайба», олимпийский стадион «Фишт») специалистами Шахраманьян А.М. и Колотовичевым Ю.А. использовались цифровые трехкомпонентные сейсмические акселерографы GMS-18-63 с датчиками ускорения производства GeoSIG Ltd.

В данной работе рассмотрены более детально четыре различных прибора, позволяющих решать поставленную задачу, с которыми наша лаборатория работала в полевых условиях при проведении НИР.

На рисунке 1.2 изображено рабочее место аппаратно-программного комплекса «Стрела-П»: на столе — базовый модуль, компьютер; на полу — катушки с соединительными кабелями. Далее на рисунке 1.3 показан внешний вид измерительных модулей. Оптимальное количество, согласно техническому описанию, пять штук.

Рисунок 1.2. Рабочее место оператора комплекса «Стрела-П» (Руководство по эксплуатации комплекса «Стрела-П»).

Рисунок 1.3. Измерительные модули комплекса «Стрела-П» (Руководство по эксплуатации комплекса «Стрела-П»).

Мобильный диагностический комплекс «Стрела-П» предназначен для оперативного неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния несущих конструкций эксплуатируемых, строящихся и реконструируемых зданий и сооружений при решении задач по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. В своем роде этот прибор является уникальным. Аналогичные приборы в виде законченных программно-аппаратных комплексов на момент написания работы в России не представлены (Техническое описание аппаратно-программного комплекса «Стрела-П»).

Методика работы предполагает наличие источника импульсного упругого воздействия. В данном комплексе таковым является пластичный груз, изображенный на рисунке 1.4. Использование пяти трехканальных датчиков позволяет покрыть большую площадь за меньшее время работы оператора. Для этого к каждому датчику подключен кабель, длиной 100 метров.

Рисунок 1.4. Возбуждение колебаний нанесением ударов пластичным грузом по колонне (Руководство по эксплуатации комплекса «Стрела-П»).

Основные технические характеристики «Стрелы», которые необходимо отметить: частота регистрируемого сигнала от 0,1 до 200 Гц; вес груза 20-40 кг (источник сигнала); питание комплекса обеспечивают 2 аккумулятора на 40000mAh, а это, к слову сказать, автомобильные аккумуляторы весом по 10-15 кг каждый. Без дополнительной подзарядки комплекс работает 1-2 смены.

Данный аппаратно-программный комплекс был опробован в тестовом режиме. В процессе развертывания системы стало понятно, что одним человеком не обойтись: каждый измерительный модуль весом около 5 кг подключается к вычислительному модулю посредством кабеля (каждая бухта кабеля, 100 метров длиной, весит около 10 кг). Управляющим модулем является ноутбук, что делает невозможным работу на открытом воздухе при температуре ниже нуля градусов по Цельсию. В технической документации говорится о том, что вычислительный модуль является встроенным, хотя на практике используется ноутбук. Встроенный вычислительный модуль предполагает единое модульное решение оцифровки и обработки данных. В процессе работы используется вспомогательное оборудование (GPS приемник) для определения позиционирования датчиков.

С точки зрения конструктивных особенностей стоит упомянуть, что оцифровка сигнала с датчиков происходит лишь в базовом модуле. А это означает, что аналоговый сигнал с датчиков проходит по кабелю длиной 100 метров, прежде, чем попасть в цифровом виде в блок обработки и вычисления. В полевых условиях, на строительных площадках присутствуют сильные электромагнитные поля, что обязательно будет искажать аналоговый сигнал, идущий по проводам.

Коротко отметим недостатки аппаратно-программного комплекса «Стрела-П»:

- использование ноутбука, в качестве управляющего блока, а значит отсутствие возможности работы при температуре ниже нуля по Цельсию;
- пониженная мобильность (крупногабаритный и тяжелый комплекс);
- использование дополнительного оборудования (GPS);
- искажение сигнала (наличие электрических наводок);
- энергоемкий комплекс;
- не подходит для неразрушающего контроля (наличие импульсного воздействия пластичным грузом).

Аппаратно-программный комплекс «Стрела-П» позиционируется как система, позволяющая решать задачу измерения и изучения динамических характеристик зданий и сооружений. Но в процессе эксплуатации возникают конкретные трудности, описанные выше. Рассмотрим пару приборов широкого профиля, которые не специализированы на решении поставленной задачи, но при определенных условиях и допусках могут быть использованы для ее решения. Это регистраторы сейсмических сигналов «Дельта-03» и «REFTEK DAS-130», производства России в 2007 г. и США в 2010 г., соответственно.

На рисунках 1.5 и 1.6 изображены регистраторы сейсмических сигналов «Дельта-03» и «REFTEK DAS-130» соответственно.

Приборы предназначены для автоматической регистрации сейсмических сигналов от естественных и искусственных источников сейсмических колебаний, включая проведение региональных сейсморазведочных работ и СМР. Кроме того, регистраторы предназначены для использования в качестве стационарной сейсмо-

логической станции с регистрацией данных на съемном Flash-диске большой емкости и передачей данных на персональный компьютер для анализа.

Рисунок 1.5. Внешний вид регистратора сейсмических сигналов «Дельта-03» (Руководство по эксплуатации «Дельта-03»).

Рисунок 1.6. Внешний вид регистратора сейсмических сигналов «REFTEK DAS-130» (Булыгин Ф.В. Описание типа средства измерений: регистратор цифровой сейсмический REFTEK DAS-130).

Данные приборы могут быть применены для решения задачи измерения и изучения сейсмодинамических характеристик, с определенными допусками. Аппаратная часть подходит для выполнения указанной задачи: сигнал может быть записан, оцифрован и передан в PC. В программе-обработчике можно вычислить спектры сигналов и визуально выделить резонансную частоту. Так как разработчики указанных регистраторов не специализируются на решении поставленной нами задачи, то в комплект поставки не входит ПО для расчетов амплитуд смещения, скорости, ускорения, декремента затухания. Все дальнейшие вычисления необходимо выполнять на стороннем ПО.

Рассмотрим технические характеристики каждого из приборов:

- «Дельта-03»: диапазон регистрируемых частот от 0,1 до 240 Гц; АЦП 24 бит; потребляемая мощность 2,5 Вт (вместе с активной GPS антенной); температурный рабочий диапазон -40…+60 °С; наличие GPS; вес 2 кг; габариты 257x169x61 мм (Руководство по эксплуатации «Дельта-03»).

- «REFTEK DAS-130»: диапазон регистрируемых частот от 0,1 Гц до 50 Гц; потребляемая мощность 2,4 Вт (вместе с активной GPS антенной); АЦП 24 бит; температурный рабочий диапазон -20…+60 °С; наличие GPS; вес 2 кг; габариты 360x200x140 мм (Булыгин Ф.В. Описание типа средства измерений: регистратор цифровой сейсмический REFTEK DAS-130).

Регистраторы неоднократно были использованы в процессе НИР в полевых условиях. Кроме громоздких и тяжелых аккумуляторов (10-15 кг каждый) в процессе работы возникали трудности с GPS. Процесс нахождения спутников после включения прибора «Дельта-03» затягивался и доходил до 15 минут. «Холодный старт» «REFTEK DAS-130» составляет всего 45 секунд, но это только для открытой местности. В закрытых помещениях возникали трудности с поиском спутников.

Также отметим еще одну особенность «REFTEK DAS-130»: запись информации на диск производится в своем внутреннем формате. А это значит, что при появлении все новых и новых задач приходится заказывать дополнительные программные продукты у производителя.

Оба регистратора, рассмотренные выше, имеют схожие технические характеристики, но в процессе полевых работ «REFTEK DAS-130» оказался проще в управлении, технологически более защищенным от воздействия окружающей среды. Прибор «Дельта-03» в шести случаях из десяти имел проблемы с записью на внешний диск памяти, чего не наблюдалось в REFTEK.

Наряду с вышеперечисленными приборами, частично решающими задачи по изучению сейсмодинамических характеристик, рассмотрим разработанный в лаборатории сейсмометрии института геофизики УрО РАН в 2006 году аппаратно-программный комплекс «Регистр-3MS». Вид регистратора показан на рисунке 1.7. При разработке перед конструктором стояли следующие задачи: уменьшить энергопотребление прибора, увеличить помехозащищенность и отказоустойчивость. Именно поэтому в регистраторе используется встроенная память.

Отдельно отметим, что в работе используется название регистратора сейсмических сигналов «Регистр», без номера версии. Изначально в лаборатории сейсмометрии ИГФ УРО РАН был разработан «Регистр-3MS». В финальном варианте, после внедрения дополнительных модулей, прибор будет иметь новое название «Регистр-3MSD». В процессе исследований, приведенных в данной работе, прибор находится в промежуточной стадии. Чтобы не возникло путаницы, в работе используется сокращенное название «Регистр».

Прибор предназначен для регистрации сейсмических сигналов от естественных и искусственных источников сейсмических колебаний, включая проведение региональных сейсморазведочных работ и СМР.

Принцип действия и методика работы аналогична описанным выше двум сейсмическим регистраторам. Имеющегося в комплекте ПО также недостаточно для полного цикла автоматизированного расчета сейсмодинамических характеристик.

Рисунок 1.7. Внешний вид регистратора сейсмических сигналов «Регистр» (Сенин Л.Н. Паспорт технический «Регистр-3MS»).

Технические характеристики «Регистр-3MS», которые стоит отметить – это диапазон регистрируемых частот от 0,01 до 64 Гц; АЦП 16 бит; потребляемая мощность 0,36 Вт; температурный рабочий диапазон -30…+45 °С; вес 0,5 кг; габариты 155x170x65 мм (Паспорт «Регистр-3MS»).

В полевых условиях прибор работал без сбоев. Встроенная память, возможность работать автономно без вычислительного модуля, мобильность, малые габариты – все это помогает оператору работать быстрее во время смены. Благодаря малому потреблению, прибору достаточно аккумулятора емкостью 12 А/ч, чтобы работать до 15 смен. Заметим, что вес такого аккумулятора не более 3 кг. Вспомогательное оборудование при работе в полевых условиях – это GPS приемник для установления позиционирования. Так как встроенный GPS отсутствует, то периодически возникает необходимость синхронизации часов регистратора с

PC. Недостатком в процессе эксплуатации прибора является малый объем диска памяти. Так как в «Регистр-3MS» память встроенная, то после заполнения диска необходимо подключение к PC для скачивания данных и очистки встроенной памяти прибора. Отметим, что скорость обмена данными составляет всего 250 кбод (при такой скорости 100 Мб будут скачиваться 30 минут).

В таблице 1.1 приведен сравнительный анализ функционала четыре различных приборов с целью определения возможности использования для измерения и изучения сейсмодинамических характеристик объектов и сред.

Таблица 1.1. 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 1.1, 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 сильные стороны прибора: низкая потребляемая мощность, габариты. После внедрения аппаратных и программных разработок, описанных в работе, в базовую модель «Регистр-3MS», в результате будет получен новый прибор «Регистр-3MSD», превосходящий аналоги по техническим, программным и методическим характеристикам (Таблица 1.2).

Аппаратно-программный комплекс «Регистр» позволяет оперативно изучать сейсмодинамические характеристики объекта в условиях интенсивных промышленных шумов. Решение указанных задач соответствует введенным на территории РФ ГОСТ 31937-2011.

Таблица 1.2. 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	-	+	+	-	+

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 переходника FTDI-245), что позволило сократить количество носимого оборудования при полевых работах, увеличило продолжительность автономной работы и скорость обмена данными с PC (рисунок 2.0.1).

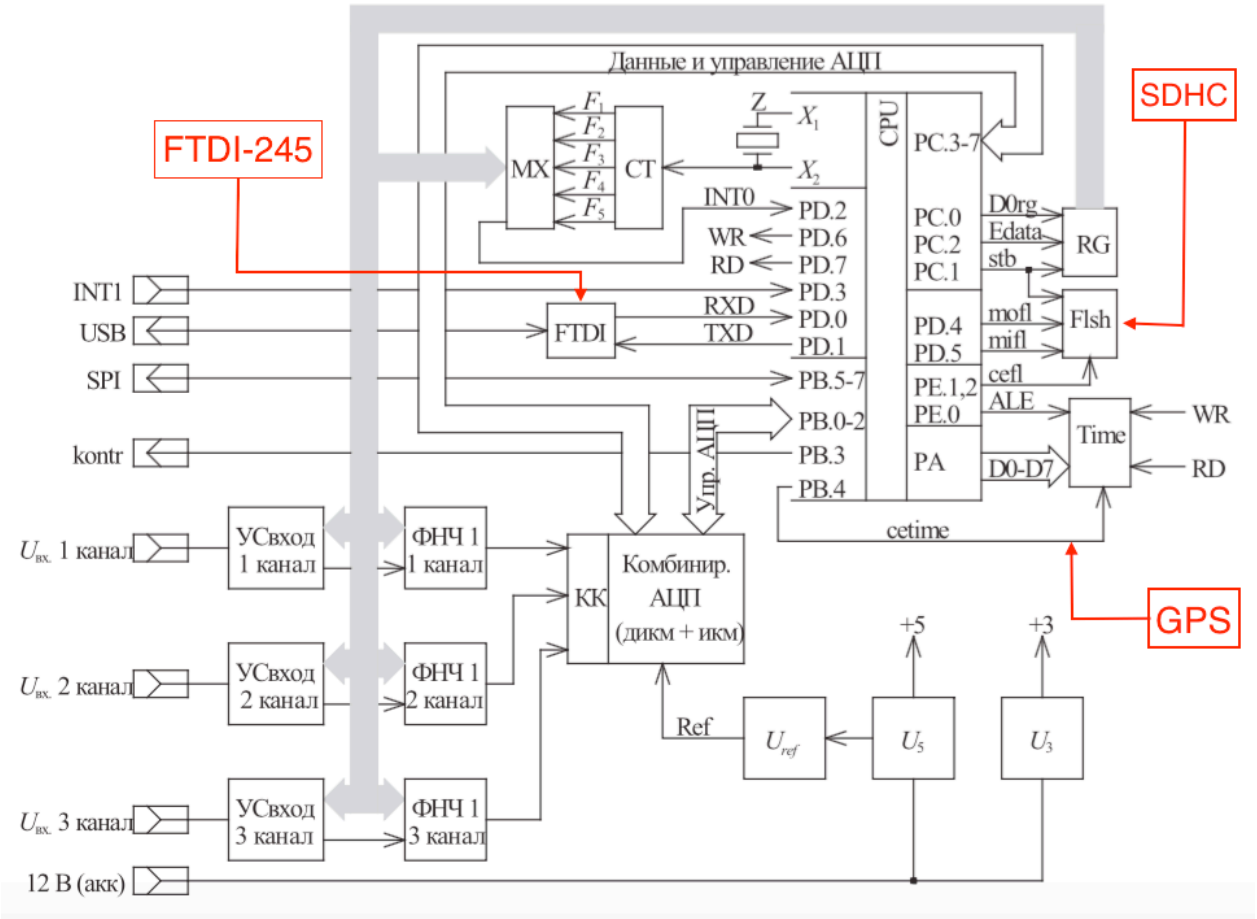

Рисунок 2.0.1. Структурная схема регистратора сейсмических сигналов «Регистр» с внесенными изменениями и дополнениями (красного цвета).

2.1. Управляющий контроллер

К одному из распространенных классов современной сейсморегистрирующей аппаратуры, предназначенной для изучения структурных особенностей верхней части геологической среды, относятся переносные малоканальные сейсмические станции. Они предназначены главным образом для изучения верхней части геологического разреза на глубину не более первых десятков метров. Очень важные характеристики для такого рода аппаратуры – экономичность, компактность, стабильность работы в широком диапазоне изменения температур, устойчивость к механическим воздействиям.

Большинство современных модификаций такого рода станций включают, по меньшей мере, два блока: блок предварительной аналоговой обработки и АЦП и блок предварительной цифровой обработки и накопления данных. При этом второй блок, как правило, персональный компьютер типа Notebook, подключенный к первому через какой-либо стандартный порт ввода-вывода.

Понятно, почему полиблочная структура станций нашла сегодня широкое распространение среди разработчиков и производителей: во-первых, отпадает необходимость разработки и изготовления цифровой части сейсмостанции; во-вторых, программу обработки и управления легко написать на языке высокого уровня.

Вместе с тем, за относительно небольшие затраты на проектирование и изготовление полиблочной станции впоследствии расплачивается пользователь. Прежде всего, она перестает быть экономичной и компактной, превращаясь из носимой в транспортируемую на автомобиле. Вследствие этого применение станции ограничивается проходимостью автомобиля, т. е. в труднодоступных участках местности исследования проводить практически невозможно, снижается рентабельность работ.

Использование Notebook в составе полевой аппаратуры подразумевает, что компьютер должен быть выполнен, по меньшей мере, в варианте Industrial, а лучше Millitary. Однако стоимость таких модификаций Notebook в несколько раз

превышает стоимость коммерческой версии компьютера. По этой причине пользователь предпочитает именно коммерческий вариант, заведомо ограничивая возможности станции. Например, в зимнее время работать с такой аппаратурой нельзя (Сенин Л. Н., Сенина Т. Е. Полевые сейсморегистрирующие приборы).

К другому типу малоканальных сейсморегистрирующих систем относятся 3 – 6 канальные приборы, предназначенные для сейсмологических исследований. Здесь также, как в описанных выше приборах, зачастую нерационально используются мощные высокопроизводительные процессоры, на месте которых с успехом могут быть применены современные экономичные контроллеры общего назначения.

Развитие микроэлектроники и широкое применение ее изделий в промышленности, в устройствах и системах управления самыми разнообразными объектами и процессами, является в настоящее время одним из основных направлений научно-технического прогресса.

Использование микроэлектронных средств в изделиях производственного или бытового назначения приводит к повышению технико-экономических показателей изделий (стоимости, надежности, потребляемой мощности, габаритных размеров), а также придает им принципиально новые потребительские качества (модифицируемость, адаптивность и т. д.).

За последние годы в микроэлектронике бурное развитие получило направление, связанное с выпуском однокристальных микроконтроллеров, которые предназначены для «интеллектуализации» оборудования различного назначения. Однокристальные МК представляют собой приборы, конструктивно выполненные в виде БИС (Большая Интегральная Схема) и включающие в себя все составные части микро-ЭВМ: микропроцессор, память программ и память данных, а также программируемые интерфейсные схемы для связи с внешней средой.

Сегодня в мире выпускаются тысячи типов МК. В группе лидеров такие компании, как Atmel, Dallas Semiconductor, Intel, Infineon Technologies, Microchip Technology Inc., Philips Semiconductors, Zilog и др. Основной классификационный признак МК – разрядность данных, обрабатываемых арифметико-логическим

устройством (АЛУ). По этому признаку они делятся на 4-, 8-, 16-, 32- и 64-разрядные.

Одними из наиболее востребованных контроллеров с RISC-процессором являются МК AVR фирмы Atmel. Они представляют собой мощный инструмент для создания современных высокопроизводительных и экономичных многоцелевых контроллеров. В начале 2002 года соотношение «цена — производительность — энергопотребление» для AVR являлось одним из лучших на мировом рынке 8-разрядных МК. Начиная с 1997 года, объёмы продаж AVR в мире удваивались ежегодно. В геометрической прогрессии росло число сторонних фирм, разрабатывающих и выпускающих разнообразные программные и аппаратные средства поддержки разработок для них. Можно считать, что AVR постепенно становился ещё одним индустриальным стандартом среди 8-разрядных МК общего назначения (Кривченко Игорь. Компоненты и технологии. №3, 2002 г.).

Идея создания RISC-ядра родилась в 1994 году в Норвегии. В 1995 году два его изобретателя Альф Боген (Alf-Egil Bogen) и Вегард Воллен (Vegard Wollen) предложили корпорации Atmel выпускать новый 8-разрядный RISC-МК как стандартное изделие и снабдить его Flash-памятью программ на кристалле (Кривченко Игорь. Компоненты и технологии. №1, 2004 г.). Руководство Atmel Corp. приняло решение инвестировать данный проект. В 1996 году был основан исследовательский центр в городе Тронхейм (Норвегия). Оба изобретателя стали директорами нового центра, а микроконтроллерное ядро было запатентовано и получило название AVR (Alf-Egil Bogen + Vegard Wollen + RISC). Первый опытный кристалл 90S1200 был выпущен на стыке 1996–1997 годов, а с 3 квартала 1997 года корпорация Atmel приступила к серийному производству нового семейства МК и к их рекламной и технической поддержке. Первый специализированный технический семинар по AVR состоялся в октябре 1997 года в городе Нетания (Израиль).

Информация по МК постоянно обновляется, и добавляются технические данные в электронном виде (Datasheet), которые Atmel Corp. регулярно размещает на своей информационной странице по AVR в Интернете (www.atmel.com), за которыми нужно постоянно следить. На этой странице также публикуются замечен-

ные ошибки в кристаллах (Errata Sheet), списки МК, планируемых к снятию с производства, а также другая полезная информация. Все внесённые изменения на сайте корпорации за последние 30 дней отражаются на странице «What's Changed» (http://www.atmel.com/dyn/general/updates.asp). Также выпускается полная электронная техническая библиотека по всей продукции Atmel.

В зависимости от числа используемых кодов операций системы команд МК можно разделить на две группы: CISC и RISC. Термин CISC означает сложную систему команд и является аббревиатурой английского определения «Complex Instruction Set Computer». Аналогично термин RISC означает сокращённую систему команд и происходит от английского «Reduce Instruction Set Computer». Основная идея RISC архитектуры – это тщательный подбор таких комбинаций кодов операций, которые можно было бы выполнить за один такт тактового генератора. Основной выигрыш от такого подхода – резкое упрощение аппаратной реализации процессора и возможность значительно повысить его производительность. Очевидно, что в общем случае одной команде CISC соответствует несколько команд RISC. Выигрыш от повышения быстродействия в рамках RISC перекрывает потери от менее эффективной системы команд, что приводит к более высокой эффективности RISC систем в целом по сравнению с CISC. Однако в настоящее время грань между CISC и RISC архитектурой стремительно стирается. Например, МК семейства AVR фирмы Atmel имеют систему команд до 133 инструкций, что соответствует типу CISC. Однако большинство из них выполняется за один такт, что является признаком RISC архитектуры. Сегодня принято считать, что признаком RISC архитектуры является выполнение команд за один такт тактового генератора. Число команд само по себе значения уже не имеет.

Отметим основные особенности 8-ми разрядной RISC-платформы AVR (Кривченко Игорь. Компоненты и технологии. №1, 2004 г.):

- одна из самых удачных на мировом рынке МК скоростная RISC-архитектура Гарвардского типа с регистровым файлом, одинаковая для всех AVR;
- flash-память программ и память данных EEPROM на кристалле;

- функциональная совместимость AVR с объёмом памяти программ от 1 до 128 кбайт;

- широкий диапазон напряжений питания от 1,8 до 5,5 В;

- активно развивающаяся периферия, отслеживающая мировые требования к современным МК;

- отличное сочетание параметров «цена – производительность – энергопотребление» для 8-разрядных МК.

В рамках единой базовой архитектуры микроконтроллеры AVR подразделяются на три основных семейства (Таблица 2.1):

- Classic AVR;
- Mega AVR;
- Tiny AVR.

Таблица 2.1. 8-разрядные RISC-МК семейства AVR фирмы Atmel.

МК	Макс. Fтакт, Мгц	Flash, Кбайт	ЭСПЗУ, байт	СОЗУ, байт	Число UART	АЦП, вход×разр	Число линий ввода/вывода	Таймеры / счетчики	Напр. Питания, В
Attiny12	8	1	64	-	-	-	6	1	4…5,5
AT90S4433	8	4	256	128	1	6×10	20	2	4…6
AT Mega8515	16	8	512	512	1	-	35	2	4…5,5
AT Mega103	6	128	4096	4096	1	8×10	48	3	4…5,5

Примечание. *Помимо таймера/счетчика, все МК содержат WDT, компаратор, интерфейс SPI.*

Где ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, «Макс.$F_{такт.}$» - максимальная тактовая частота, ЭСПЗУ – электрически стираемое постоянное запоминающее устройство, СОЗУ – статическое оперативное запоминающее устройство, UART – универсальный асинхронный приемопередатчик, WDT – сторожевой таймер, SPI – последовательный синхронный интерфейс.

Компания Atmel в процессе развития МК AVR пошла по пути уплотнения различных функциональных узлов в корпус МК. В результате структурную схему МК можно изобразить следующим образом (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1. Структурная схема микроконтроллера
(Кривченко Игорь. Компоненты и технологии. №1, 2004 г.).

МК семейства Classic по своим параметрам близки к CISC.

Семейство Tiny имеет небольшие объемы памяти программ (1…2 Кбайт) и весьма ограниченную периферию. Практически все они выпускаются в 8-выводных корпусах и предназначены для так называемых «бюджетных» решений, принимаемых в условиях финансовых ограничений. Область применения этих МК – интеллектуальные датчики различного назначения, бытовая техника и другие подобные устройства.

Микроконтроллеры семейства Mega имеют наиболее развитую периферию, наибольшие среди всех МК AVR объемы памяти программ и данных. Они предназначены для использования в достаточно сложных интеллектуальных системах управления с вложенными элементами оперативных вычислительных устройств.

МК семейств Tiny и Mega поддерживают несколько режимов энергопотребления, имеют блок прерываний, сторожевой таймер и допускают программирование непосредственно в готовом устройстве.

Приведем диаграмму, на которой показаны различные классы микроконтроллеров Atmel. Очевидно, что с увеличением производительности, МК потребляет все больше энергии, см. рисунок 2.2 (Ламберт Елена. Компоненты и тех-

нологии, №6, 2009 г.). Исходя из соотношения производительность / энергопотребление, разработчик может выбрать тот класс МК, который оптимально подходит для решения частной задачи.

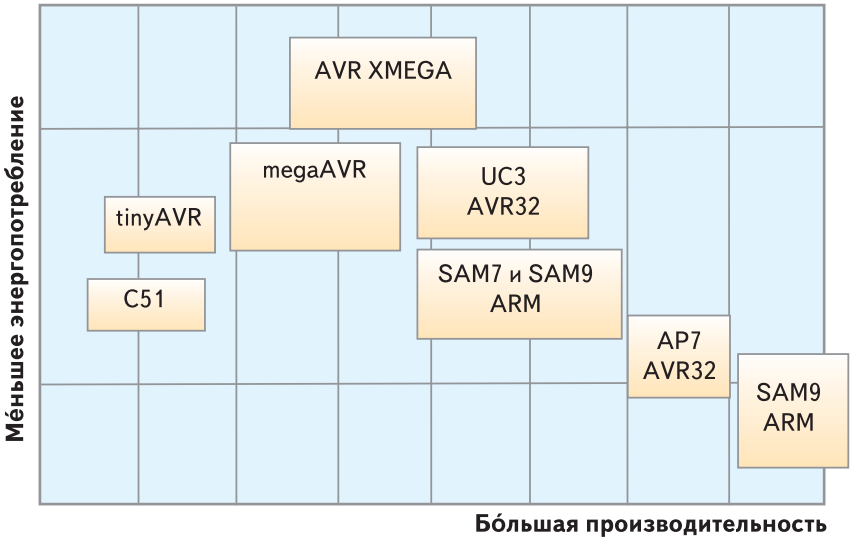

Рисунок 2.2. Спектр предлагаемых микроконтроллеров корпорации Atmel. (Ламберт Елена. Компоненты и технологии, №6, 2009 г.)

С точки зрения принципов построения малоканальной сейсморегистрирующей аппаратуры, выполнения условий функциональной необходимости и достаточности, более предпочтительным несомненно является RISC-МК. Именно такой микроконтроллер и был выбран в качестве управляющего при разработке сейсмического регистратора «Регистр», а именно: МК Atmega8515 (Сенин Л.Н. и др. «Промышленные АСУ и контроллеры», 2011 г. № 9).

Основные технические характеристики модели Atmega8515 приведены в таблице 2.1, расположение выводов в корпусе DIP – на рисунке 2.3, а их описание – в таблице 2.2 (Datasheet Atmega8515).

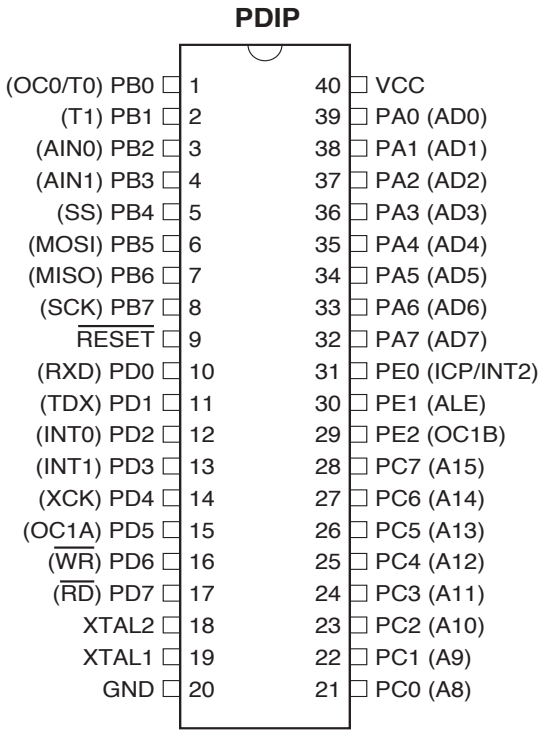

Рисунок 2.3. Расположение выводов микроконтроллера Atmega8515 (Datasheet Atmega8515).

Таким образом, внимательно изучив технические характеристики и структуру AVR контроллера Atmega8515, можно сделать следующие выводы:

1. Контроллер способен работать на частоте до 20 МГц в диапазоне температур окружающей среды -40…+85°С.

2. Контроллер имеет 35 портов ввода/вывода, которые можно запрограммировать по усмотрению пользователя.

3. Ток потребления контроллера на максимальной рабочей частоте не превышает единиц мА.

Таблица 2.2. Описание выводов модели контроллера Atmega8515.

Обозначение	№ вывода	Тип вывода	Описание
XTAL1	19	I	Вход тактового генератора
XTAL2	18	O	Выход тактового генератора
RESET	9	I	Вход сброса (НИЗКИМ уровнем)
Порт A. 8-разрядный двунаправленный порт ввода/вывода с внутренними подтягивающими резисторами.			
PA0(AD0)	39	I/O	A0 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA1(AD1)	38	I/O	A1 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA2(AD2)	37	I/O	A2 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA3(AD03	36	I/O	A3 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA4(AD4)	35	I/O	A4 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA5(AD5)	34	I/O	A5 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA6(AD6)	33	I/O	A6 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
PA7(AD7)	32	I/O	A7 (мультиплексная ША/ШД для внешнего ОЗУ)
Порт B. 8-разрядный двунаправленный порт ввода/вывода с внутренними подтягивающими резисторами.			
PB0(T0/OC0)	1	I/O	B0(Вх/вых. Такт. Сигнала таймера/счетчика T0 (режим PWM)
PB1(T1)	2	I/O	B1(Вход. Такт. Сигнала таймера/счетчика T1)
PB2(AIN0)	3	I/O	B2(Положительный вход компаратора)
PB3(AIN1)	4	I/O	B3(Отрицательный вход компаратора)
PB4(SS)	5	I/O	B4(Выбор Slave устройства на шине SPI)
PB5(MOSI)	6	I/O	B5(Выход Master или вход Slave данных модуля SPI)
PB6(MISIO	7	I/O	B6(Вход Master или выход Slave данных модуля SPI)
PB7(SCK)	8	I/O	B7(Выход Master или вход Slave тактового сигнала модуля SPI)
Порт C. 8-разрядный двунаправленный порт ввода/вывода с внутренними подтягивающими резисторами.			
PC0(A8)	21	I/O	C0 (ША для внешнего ОЗУ)
PC1(A9)	22	I/O	C1 (ША для внешнего ОЗУ)
PC2(A10)	23	I/O	C2 (ША для внешнего ОЗУ)
PC3(A11)	24	I/O	C3 (ША для внешнего ОЗУ)
PC4(A12)	25	I/O	C4 (ША для внешнего ОЗУ)
PC5(A13)	26	I/O	C5 (ША для внешнего ОЗУ)
PC6(A14)	27	I/O	C6 (ША для внешнего ОЗУ)
PC7(A15)	28	I/O	C7 (ША для внешнего ОЗУ)
Порт D. 8-разрядный двунаправленный порт ввода/вывода с внутренними подтягивающими резисторами.			
PD0(RXD)	10	I/O	D0 (Вход USART)
PD1(TXD)	11	I/O	D1 (Выход USART)
PD2(INT0)	12	I/O	D2 (Вход внешнего прерывания)
PD3(INT1)	13	I/O	D3 (Вход внешнего прерывания)
PD4(XCK)	14	I/O	D4 (Вход/выход внешнего тактового сигнала USART)
PD5(OC1A)	15	I/O	D5 (Выход A таймера/счетчика T1 (режим PWM)
PD6(WR)	16	I/O	D6 (Строб записи во внешнее ОЗУ)
PD7(RD)	17	I/O	D7 (Строб чтения из внешнего ОЗУ)
Порт E. 3-разрядный двунаправленный порт ввода/вывода с внутренними подтягивающими резисторами.			
PE0(ICP/INT2)	31	I/O	E0 (Вход захвата таймера/счетчика T1)
PE1(ALE)	30	I/O	E1 (Строб адреса внешнего ОЗУ)
PE2(OC1B)	29	I/O	E2 (Выход B таймера/счетчика T1 (режим PWM)
GND	20	P	Общий вывод
Vcc	40	P	Вывод источника питания

Рассмотренный выше МК Atmega8515 был использован в качестве управляющего контроллера в регистраторе сейсмических сигналов «Регистр-3MS». На момент разработки регистратора это был лучший представитель семейства AVR.

Для реализации поставленных задач в «Регистр» управляющим контроллером выбран Atmega64, расположение выводов в корпусе DIP – на рисунке 2.4. Благодаря преемственности МК AVR, каждый последующий микроконтроллер программно-совместим с предыдущими версиями. Таким образом, сравнивая технические характеристики (Datasheet Atmega8515, Atmega64), видим качественное улучшение в увеличении памяти программ и памяти данных: сравнение с предыдущим МК приведено в таблице 2.3. 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 2.3. Сравнение МК Atmega 64-й серии и 8515.

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

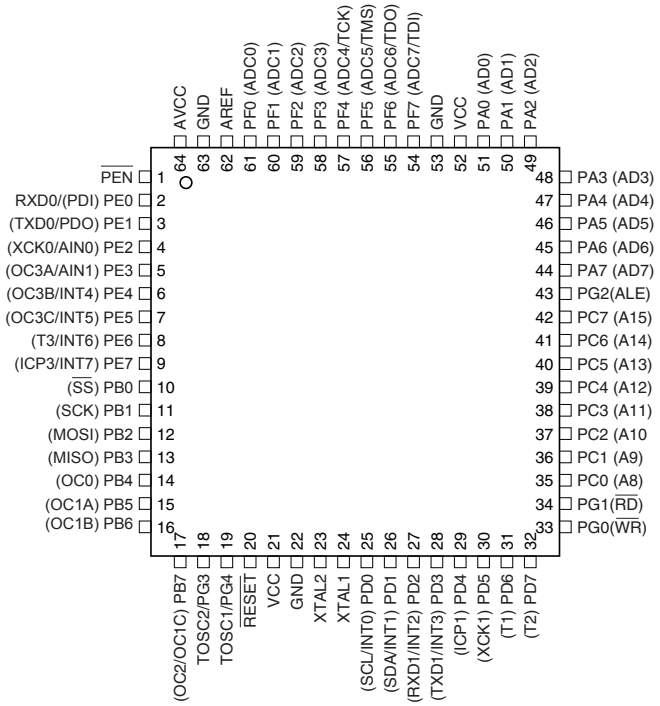

Рисунок 2.4. Расположение выводов микроконтроллера Atmega64 (Datasheet Atmega64).

При программировании преемственность микроконтроллеров AVR выражается в том, что реализованные коды для модели 8515 подходят для 64-й серии: инициализация портов ввода/вывода данных, настройка регистров, обработка прерываний. Средства разработки и отладки кода бесплатно распространяется производителем (компания Atmel) и предлагается пользователям. Внутрисистемное программирование и настройка Atmega8515 и 64-й серии осуществляется в оболочке AVR Studio 4.

О надежности и широте распространения МК AVR можно судить по частоте использования в узкоспециализированном оборудовании, таком, как сейсморегистрирующие приборы. Контроллеры AVR нашли широкое применение в различных прикладных решениях, разработанных в лаборатории сейсмометрии ИГФ УРО РАН. Далее по тексту приведены примеры реализации управляющего 8-разрядного микроконтроллера AVR общего назначения.

МК Atmega88 использован для управления адаптивным АЦП инженерной сейсмической станции «Синус» (Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Полевые сейсморегистрирующие приборы, 2013 г.).

МК Atmega8515 выполняет функции управления модулем визуализации инженерной сейсмической станции «Синус» (Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Полевые сейсморегистрирующие приборы, 2013 г.).

МК Atmega64 является управляющим модулем в приборе «Регистр», предназначенном для оперативного изучения сейсмодинамических характеристик. На рисунке 2.5 приведена принципиальная электрическая схема включения.

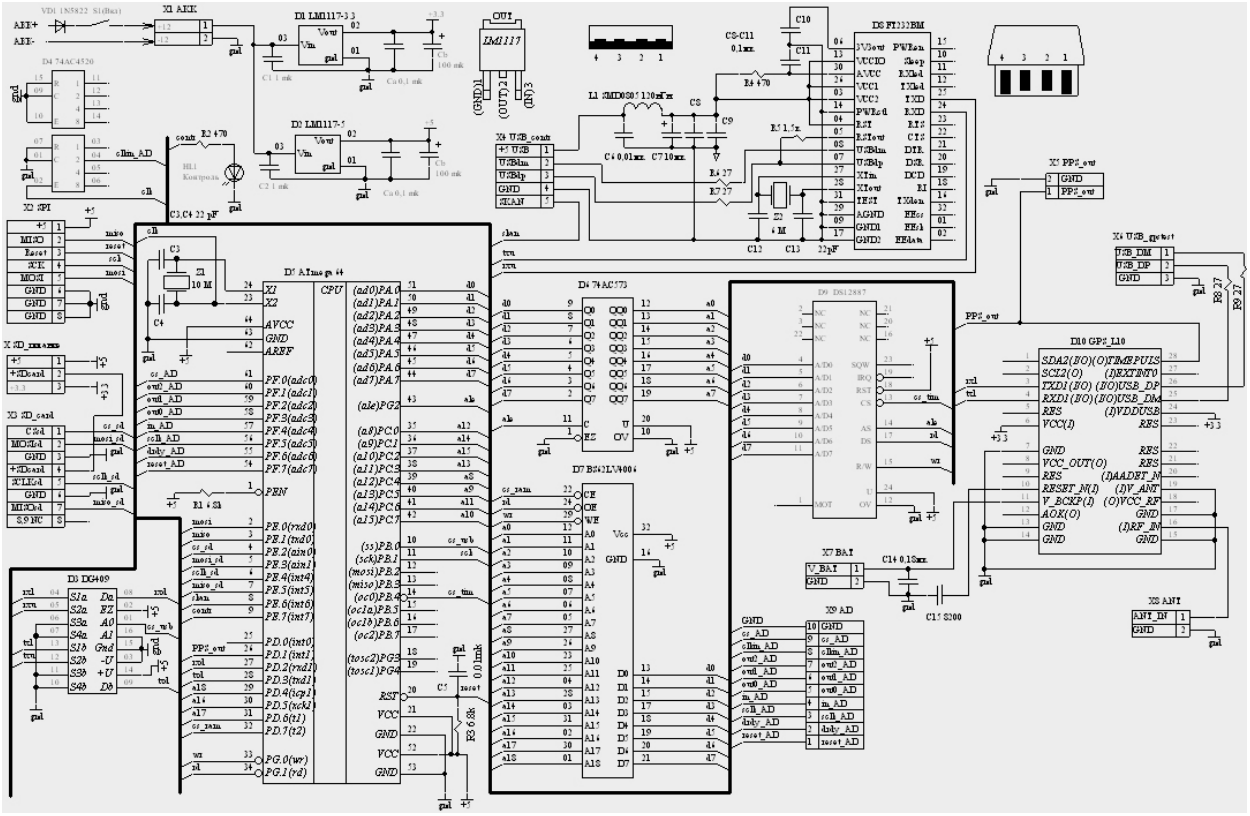

Рисунок 2.5. Принципиальная электрическая схема «Регистр» с управляющим МК Atmega64. (Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Полевые сейсморегистрирующие приборы, 2013 г.)

Использование в качестве управляющего ядра регистратора сейсмических сигналов «Регистр» микроконтроллера Atmega64 привело к следующим результатам:

- благодаря увеличенной памяти программ, удалось реализовать потенциал существующего АЦП: вместо 16 бит в работе задействованы 24 бита (Сенин Л.Н. и др. «Промышленные АСУ и контроллеры», 2015 г. № 7);

- в систему включен блок GPS (подробно рассмотрено в разделе 2.2.) и внешняя карта памяти (подробно рассмотрено в разделе 2.3.);

- сохранены прежние преимущества прибора «Регистр-3MS»: автономность рабочего процесса, экономичность энергопотребления, компактность, стабильность работы в широком диапазоне изменения температур, устойчивость к механическим воздействиям.

2.2. Модуль GPS

В основе работы системы GPS (Global Position System) находятся:

- спутниковая трилатерация (на ней базируется работа системы);

- спутниковая дальнометрия (измерение расстояний до спутников);

- точная временная привязка (высокоточная синхронизация отсчета времени в системе спутники-приемники);

- точное положение спутников в космосе;

- коррекция ошибок, вносимых задержкой радиосигнала спутника в ионосфере и тропосфере.

Спутниковая трилатерация предполагает, что точные координаты любой точки на поверхности Земли могут быть вычислены путем измерений расстояний от группы спутников, если их положение в космосе известно.

В этом случае спутники являются пунктами с известными координатами. Предположим, что расстояние от одного спутника известно, и вокруг него можно описать сферу заданного радиуса. Если известно также расстояние до второго спутника, то определяемое местоположение будет расположено где-то в круге, задаваемом пересечением двух сфер. Третий спутник определяет две точки на окружности. Четвертый спутник позволяет окончательно точно определить местоположение точки. Таким образом, зная расстояние до четырех спутников, можно вычислить координаты определяемой точки (рисунок 2.6).

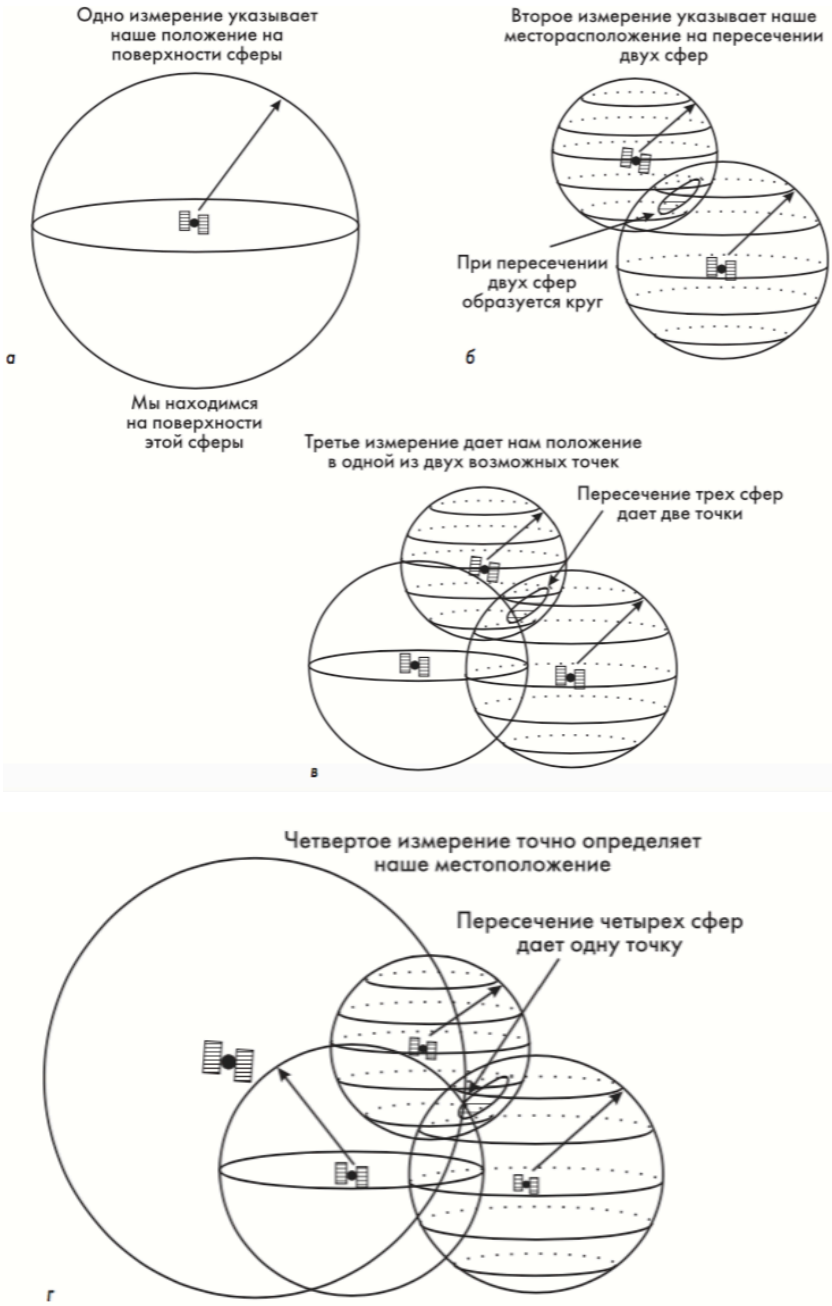

Рисунок 2.6. Схема вычисления координаты точки по расстоянию до четырех спутников. (Хрусталев Дмитрий. GPS – взгляд изнутри. Компоненты и технологии. №6. 2001 г.)

Расстояние до спутников определяется по измерениям времени прохождения сигнала от космического аппарата до приемника, умноженным на скорость света. Для того, чтобы определить время распространения сигнала, нам необходимо знать, когда он был передан со спутника. Эта информация передается со спутника в сообщении. На спутниках установлены атомные часы, имеющие точность около

одной наносекунды. Однако это решение является слишком дорогим, чтобы использовать его в приемниках GPS. Поэтому для устранения ошибок хода часов приемника используются результаты измерения сигналов от четвертого спутника. Их можно использовать для устранения ошибок, которые возникают, если часы на спутнике и в приемнике не синхронизированы. Рисунок 2.7 наглядно это показывает.

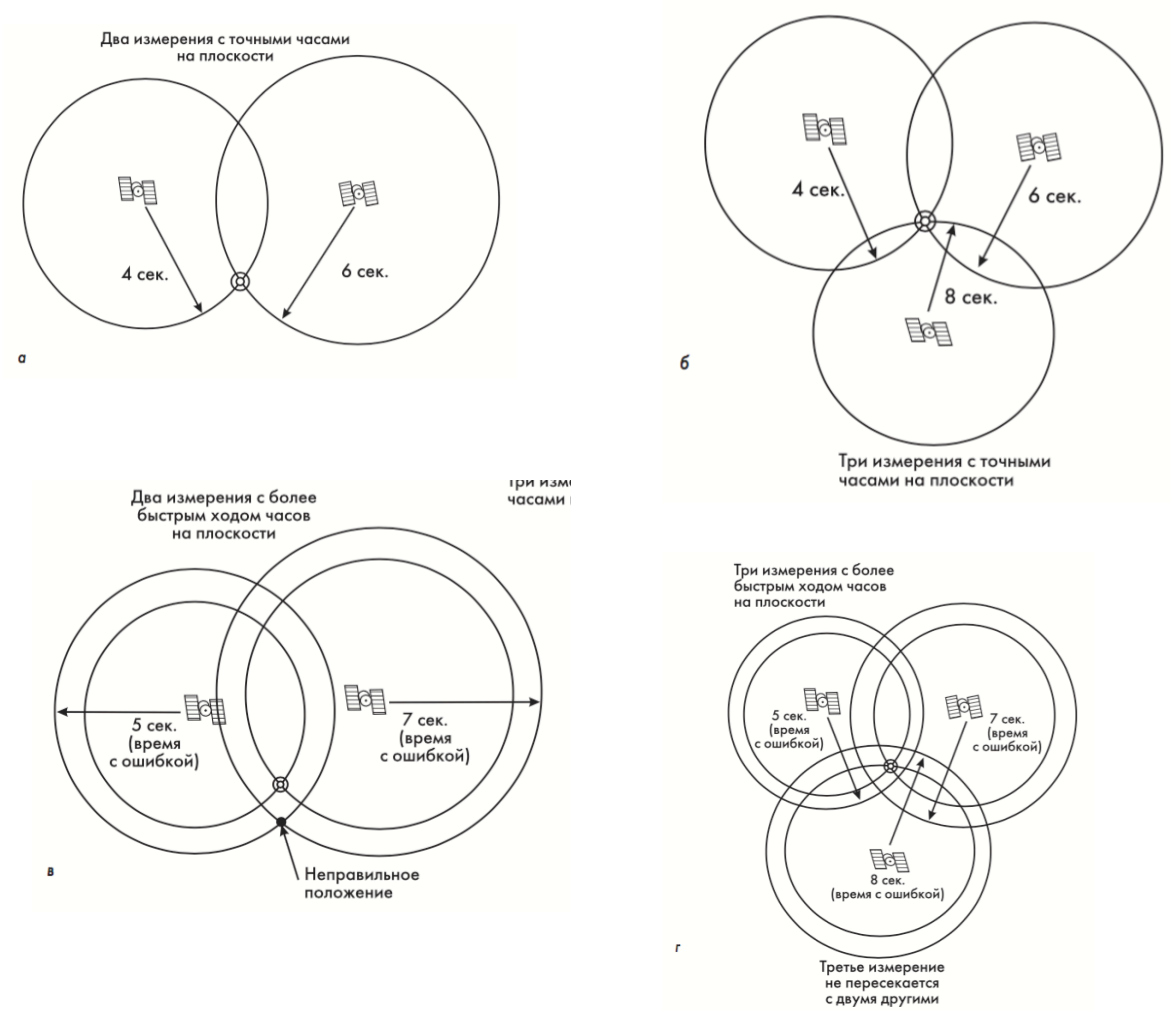

Рисунок 2.7. Схема устранения ошибок рассинхронизации приемника и передатчика. (Хрусталев Дмитрий. GPS – взгляд изнутри. Компоненты и технологии. №6. 2001 г.)

24 рабочих спутника системы Navstar расположены на высоте примерно 20200 км от поверхности Земли с орбитальным периодом в 12 часов. В шести различных плоскостях, имеющих наклон к экватору в 55°, расположено по 4 спутни-

ка. Указанная высота необходима для обеспечения стабильности орбитального движения спутников и уменьшения фактора влияния атмосферы.

Некоторые источники ошибок, возникающих при работе GPS, являются трудноустранимыми. Вычисления предполагают, что сигнал распространяется с непрерывной скоростью, которая равна скорости света. Однако на практике все обстоит гораздо сложнее. Скорость света является константой только в вакууме. Когда сигнал проходит через ионосферу и тропосферу, скорость его распространения уменьшается, что приводит к ошибкам в измерении дальности. В современных GPS-приемниках используют всевозможные алгоритмы устранения этих задержек. Иногда возникают ошибки хода атомных часов и отклонения орбит спутников, но они обычно незначительны и тщательно отслеживаются станциями слежения. Многолучевая интерференция также вносит ошибки в определение местоположения с помощью GPS. Это происходит, когда сигнал отражается от объектов, расположенных на земной поверхности, что создает заметную интерференцию с сигналами, приходящими непосредственно со спутников. Специальная техника обработки сигнала и продуманная конструкция антенн позволяют свести к минимуму этот источник ошибок (Хрусталев Дмитрий. GPS – взгляд изнутри / Компоненты и технологии. №6, 2001 г.).

При решении ряда задач геологии, геофизики и разработки нефтяных месторождений возникает необходимость определения планово-высотного положения различных объектов.

Если объем предстоящих работ велик, то имеет смысл применение стереотопографического метода координатных определений. Однако для его практической реализации потребуются относительно «свежие» аэрофотоснимки, а при их отсутствии – организация и проведение дорогостоящих аэрофотосъемочных работ.

Для определения пространственных координат возможно использование традиционных маркшейдерско-геодезических методов и средств, базирующихся на применении оптико-механических приборов, таких, как теодолиты и нивелиры. Общеизвестными их недостатками являются трудоемкость и относительно низкая производительность.

Более прогрессивные технологии основаны на использовании GPS-оборудования. Выпускаемое GPS-оборудование по точности определения координат и высот можно подразделить на три группы:

- высокоточное или фазовое (после дифференциальной коррекции - миллиметры и первые сантиметры);

- средней точности или кодовое (после дифференциальной коррекции - дециметры и первые метры, обычно до 5 метров);

- низкой точности или навигационное (при выключенном министерством обороны США режиме селективного доступа обеспечивают точность до 30 метров) (Шишунов А.Ю. Применение GPS-системы в геологии и геофизике // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. №11, 2002 г.).

Действительно, для определения координат на местности в полевых геофизических работах удобно использование GPS приемников. Выбор конкретного вида приемника зависит от решаемой задачи. В нашем случае – это работа с мобильной сейсморегистрирующей системой. А значит, GPS приемник должен обладать точностью не хуже 3-5 метров и быть доступным по ценовой категории. Так как фазовые приемники являются громоздкими и используются на стационарных точках, далее будем рассматривать GPS приемники средней точности.

Определив класс оборудования, необходимо выбрать поставщика, разработчика GPS модуля с конкретными условиями и ограничениями:

- выполнение в миниатюрном корпусе для встраивания в реализованную сейсморегистрирующую систему «Регистр»;

- низкое потребление тока и взаимодействие с пассивной антенной (обусловлено автономной работой прибора);

- наличие USB-интерфейса для связи с PC;

- наличие и доступность на рынке РФ.

Всем предъявленным требованиям соответствует выбранный GPS модуль L10 производителя Quectel (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры, №5, 2014 г.).

В таблице 2.4 приведен сравнительный анализ встраиваемых модулей GPS по масса-габаритным показателям, а также по важному параметру: точность отметок времени (Бурдинский И.Н. Использование GPS-модулей в системах временной синхронизации // Вестник ТОГУ, 2010, №4(19)).

Таблица 2.4. Сравнение встраиваемых GPS модулей различных производителей.

Тип	**Производитель**	**Число каналов**	**Точность отметок времени (нс)**	**Габариты (мм); масса (г)**
Lassen iQ	Trimble	12	50	26x26x6; 6.5
L10	Quectel	66	61	22.4x17x3; 2.2
A1029	Tyco	12	90	22x28x3.2; 2
МНП-М5	ОАО ИРЗ	24	100	31x40x4; 7
A12/B12	Thales	12	250	40x61x15; 45.4
Jupiter 21	Navman	12	300	40.6x71.1x11.5; 25
M12	Motorola	12	500	40x60x10; 25
GPS-15H(L)	Garmin	12	1000	35.56x45.85x8.31; 15
ET-332	Globalsat	20	1000	35x40.5x10; -

Рассматривая характеристики и массогабаритные показатели различных встраиваемых GPS модулей, остановимся более подробно на двух из них производства компании Trimble и Quectel. В таблице 2.5 приведено более детальное сравнение технических характеристик этих модулей. В первом приближении технические характеристики практически одинаковые. Но на практике GPS модуль L10 продемонстрировал лучшие показатели по следующим параметрам: поиск и захват спутников, время холодного старта (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры, №5, 2014 г.).

Таблица 2.5. Сравнение встраиваемых GPS модулей Trimble и Quectel.

Характеристики	**Trimble 46240-25**	**Quectel L10**
Производитель	Trimble Navigation Limited	Quectel
Поддерживаемые системы	GPS	GPS
Интерфейс	UART	UART, USB
Поддерживаемые протоколы	NMEA	NMEA
Количество каналов	12	66
Точность горизонтальных координат	2.5м (50%) 5м (90%)	3м
Точность определения скорости	0.06 м/с	0.1 м/с
Точность отметок времени	50 нс	61 нс
Время холодного старта	50 с	35 с
Время тёплого старта	38 с	35 с
Время горячего старта	10 с	<1.2 с
Напряжение питания	3.3 В	3.3 В
Потребляемая мощность	120 мВт	140 мВт
Рабочая температура	-40...85 °С	-40...85 °С
Температура хранения	-55...105 °С	-45...125 °С
Размер	26 х 26 х 6 мм	22,4 х 17 х 3 мм

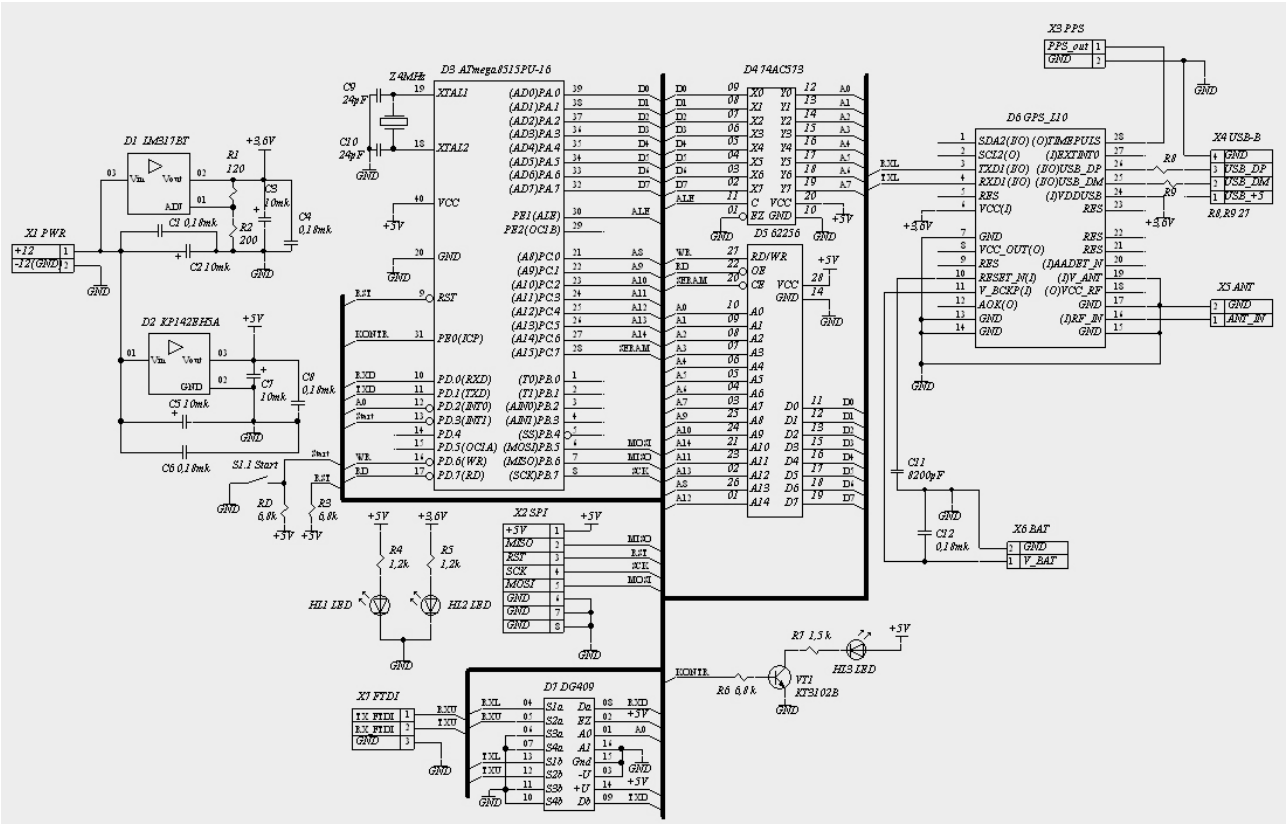

Рисунок 2.8. Принципиальная электрическая схема включения L10 в «Регистр».

Выше, на рисунке 2.8, представлена принципиальная электрическая схема включения GPS модуля Quectel L10 в состав регистратора сейсмических сигналов «Регистр», основным управляющим элементом которого является AVR микроконтроллер ATmega8515 (Datasheet ATmega8515). Перечислим элементы схемы:

- управляющий элемент – микроконтроллер AVR ATmega8515, элемент D3;
- ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) D5;
- GPS-блок в виде микросхемы D6 Quectel L10;
- мультиплексор D7, выполняющий функцию коммутатора;
- выводы SPI (serial peripheral interface) для внутрисистемного программирования;
- модуль FTDI (Future Technology Devices International) для преобразования контроллерного протокола UART в стандартный протокол USB с целью передачи данных в компьютер (на схеме не показан);
- блоки питания «+5» и «+3,6» Вольт, соответственно микросхемы D2 и D1.

Приведенная на рисунке схема предназначена для реализации и отладки механизма передачи данных от модуля L10 в микроконтроллер и последующей записи в ОЗУ. Далее выделенный и записанный в ОЗУ блок данных сохраняется на флэш-диске регистратора (на принципиальной схеме не показан). Обмен данными от L10 в контроллер и из контроллера в PC реализован через UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), включающий две приемо-передающие линии RXD и TXD.

Из рисунка видно, что элементы схемы содержат 2 пары таких линий (RX и TX). Одна пара принадлежит контроллеру D3 (RXD и TXD), вторая – модулю L10 (выводы RXL и TXL микросхемы D6). Однако для обеспечения передачи информации в компьютер требуется еще одна пара линий RX и TX. Для организации третьей пары служит мультиплексор D7. Коммутация каналов RX и TX осуществляется с помощью управляющего сигнала A0 (линия PD.2 контроллера D3). При логическом нуле на этом выводе контроллер подключается к GPS модулю, при логической единице - контроллер переключается на внешние контакты разъ-

ема X7 FTDI, предназначенные для организации связи с внешним PC. Обращение к оперативной памяти D5 организовано с помощью буферного регистра D4.

Выводы 25 и 26 микросхемы D6 предназначены для связи GPS модуля L10 с USB внешнего компьютера. Данная связь позволяет с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) настроить работу GPS модуля. Спутниковая антенна подключается к выходам 16 и 17 GPS модуля. Именно она является «поставщиком» необходимой информации (координаты, время), поэтому при размещении элементов схемы на печатной плате необходимо соблюдать все требования к топологии, приведенные в инструкции для модуля L10 фирмы Quectel (Datasheet L10).

«Общение» между спутниками (источниками) и приемниками сигнала происходит по NMEA протоколу.

Национальная ассоциация морской электроники (National Marine Electronic Association - NMEA) разработала специальный протокол для поддерживания совместимости морского навигационного оборудования различных производителей.

Интерфейс обмена данными большинства портативных GPS приемников реализован в соответствии с NMEA спецификацией. Эти данные содержат полные навигационные измерения GPS приемника – позицию, скорость и время. Каждое отдельное сообщение не зависит от других и является полностью «завершенным». Некоторые из NMEA сообщений могут содержать одинаковые поля данных либо полностью содержать данные других, меньших по размеру, NMEA сообщений.

Протокол NMEA не предусматривает посылку запросов в приемник.

NMEA сообщение включает заголовок, набор данных, представленных ASCII символами, и поле контрольной суммы для проверки достоверности переданной информации. Все сообщения имеют единый формат, поля данных разделены запятыми. Если какие-либо данные отсутствуют внутри строки, запятые всё равно ставятся.

Для обработки информации о текущем местоположении объекта целесообразно использовать сообщение вида RMC (рекомендованный минимальный набор GPS данных).

Структура сообщения RMC:

$GPRMC,hhmmss.ss,A,llll.ll,a,yyyyy.yy,a,x.x,x.x,xxxxxx,x.x,a,a*hh

Полями данного сообщения являются:

1. hhmmss.ss – время;
2. A – статус (A/V);
3. llll.ll,a – широта, N/S;
4. yyyyy.yy,a – долгота, E/W;
5. x.x – скорость в узлах;
6. x.x – курс в градусах;
7. xxxxxx – дата: dd/mm/yy (день/месяц/год);
8. x.x,a – магнитное склонение в градусах, E/W;
9. a – индикатор режима: A = автономная обсервация; D = дифференциальный режим; N = данные недостоверны (Нечаев Е.Е. Научный вестник МГТУ ГА, №158, 2010 г.).

Во время работы регистратора используется информация из сообщений, поступающих на GPS антенну, о дате, времени, координатах, т. е., как отмечалось выше, данные, входящие в сообщение RMC. Поэтому при написании кода программы для управляющего контроллера регистратора «Регистр» анализировалось именно это сообщение. На рисунке 2.9 указан порядок работы программы получения информации от L10 и записи в ОЗУ. В блок-схеме прописана логика работы программы. Для того, чтобы получить данные от GPS-модуля, необходимо настроить UART и разрешить прерывания от UART при работе программы в микроконтроллере. Также необходимо указать место в ОЗУ, куда нужно записывать данные из GPS. При передаче сообщения от GPS в микроконтроллер анализируются следующие данные: RMC-сообщение от GPS, флаги состояний End (полнота принятого сообщения) и Valid (корректность данных позиционирования). Состояние “1” флагов соответствует корректному выполнению условия. Окончание программы – это запись сообщения RMC в ОЗУ.

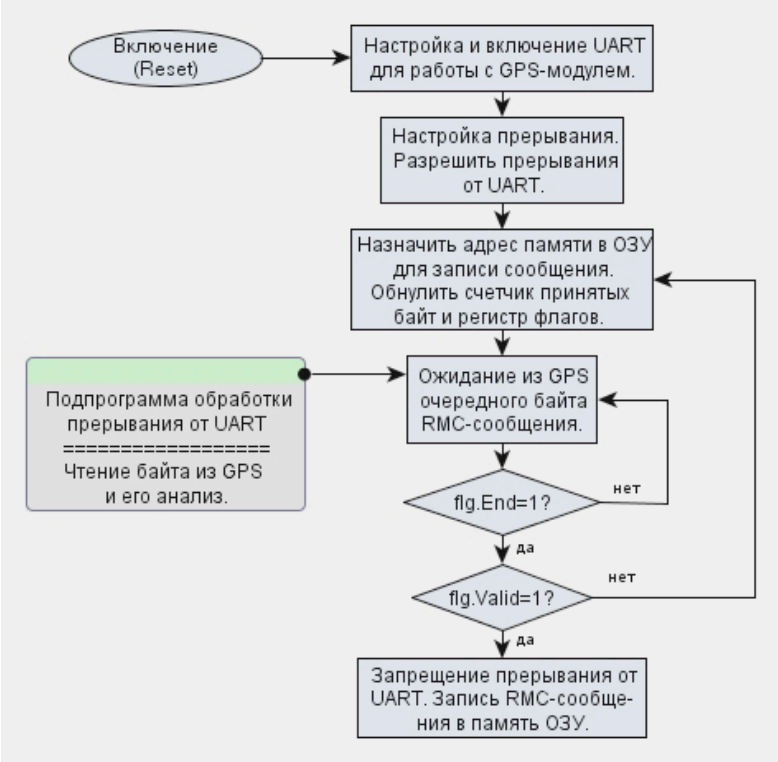

Рисунок 2.9. Блок схема работы программы получения информации от L10.

Для связи GPS-приемника с микропроцессором используется встроенный последовательный асинхронный порт UART. Настройка порта предусматривает следующие параметры: 9600-8-N-1, т. е. скорость передачи данных равна 9600 бит/сек., каждый байт передается 8 битами данных, без контроля четности, 1 стоп-бит.

Далее на рисунке 2.10 приведен текст программы для приема и анализа данных из модуля L10, состоящий из двух основных блоков. Первый блок содержит программу настройки UART. Второй блок предназначен для формирования команд передачи данных из L10 и записи в ОЗУ

```
;***  Подпрограмма обработки прерывания от UART:   ***
;***              прием и анализ байта из GPS              ***
;-----------------------------------------------------------------------------
;Определение регистров
.def btgps= r17 ; регистр размещения принятого байта
.def Nbt=   r18 ; счетчик принятых байт сообщения
.def Nzpt=  r19 ; счетчик полей данных
;Описание регистра флагов
.def flg=   r16 ; регистр флагов:
.equ Rmc=   0 ; флаг приема заголовка, устанавливается в 1 после
                ; приема заголовка '$GPRMC'
.equ Save=  1 ; флаг записи байта, устанавливается в 1, если
                ; принятый байт подлежит сохранению в памяти ОЗУ


.equ Valid= 2 ; флаг статуса данных, устанавливается в 1, если
                ; данные позиционирования достоверные
.equ End=   3 ; флаг завершения приема сообщения
;Макросы
.Macro  bitcl ;@0.@1 <-0 BitClear
        clt
        bld     @0,     @1
.EndMacro
;m
.Macro  bitset ;@0.@1<-1 BitSet
        set
        bld     @0,     @1
.EndMacro
;-----------------------------------------------------------------------------
GetByte: ; начало подпрограммы обработчика прерывания
        bitcl flg, Save ; очистка флага записи байта
        in      btgps,  UDR ; чтение байта из регистра данных порта UART
        sbrs    flg,    Rmc ; пропустить переход,если установлен флаг приема
                            ;заголовка
        rjmp    wtRmc       ; переход на ожидание кода $24 первого символа '$'
        cpi     Nzpt,   2   ; принят статус данных?
        breq    chkValid    ; да, переход на анализ статус данных
        cpi     btgps,  $2c ; принят символ ','?
        breq    ifZpt       ; переход на обработку принятых запятых
        cpi     btgps,  $2a ; принят символ конца сообщения '*'?
        breq    ifEnd       ; да, переход на завершение приема сообщения
        rjmp    iReturn     ; холостой переход на выход
;-----------------------------------------------------------------------------
iclret: ; сброс для приема RMC-сообщения и выход
        clr     Nbt   ; очистка счетчика принятых байт сообщения
        clr     flg   ; очистка регистра флагов
        rjmp    iReturn ; переход на выход из обработчика
iretsv:  ; установка флага для записи и выход
        bitset flg,Save ; флаг записи байта = 1
iReturn: ; метка единого выход из обработчика прерывания
        ret;i ; выход из обработчика прерывания
            ; если флаг End=1 и флаг Valid=1, то в основной программе будет
            ; сохранено RMC-сообщение длиной Nbt
```

Рисунок 2.10. Текст программы настройки L10.

На рисунке 2.10 горизонтальными линиями выделены три фрагмента текста программы. В первом их них описаны регистры, флаги и макросы. В микроконтроллере ограниченное количество регистров, которые можно использовать при работе в каждый момент времени. Поэтому в программе каждой переменной назначаем конкретный регистр. Обозначение флагов помогает управлять логикой программы. Макросы выполняют функцию, неоднократно используемую в программе.

Второй фрагмент описывает подпрограмму обработчика, получение каждого байта RMC сообщения из регистра данных UART. Каждый символ анализируется и принимается решение о том, что строка принята полностью, с начального символа “$” до символа окончания строки “*”.

```
ifZpt: ; принят символ ','
        inc     Nzpt
        rjmp    iretsv ; байт для записи и выход из обработчика
;
chkValid: ; анализ статус данных
        cpi     btgps,  $41   ; принят символ 'A'?
        brne    iretsv          ; нет, байт для записи и выход из обработчика
        bitset flg, Valid       ; установка флага 'Данные достоверные'
        rjmp    iretsv          ; байт для записи и выход из обработчика
;
ifEnd: ; принят символ '*', завершение приема сообщения
        bitset flg, End ; установка флага 'Завершить прием сообщения'
        rjmp    iretsv     ; байт для записи и выход из обработчика
;
wtRmc: ; ожидание заголовка
        cpi     Nbt,    0 ; принято 0 байт?
        breq    wtId0     ; да, к ожиданию символа '$'
        cpi     Nbt,    1 ; принят 1 байт?
        breq    wtG       ; да, к ожиданию символа 'G'
        cpi     Nbt,    2 ; принято 2 байта?
        breq    wtP       ; да, к ожиданию символа 'P'
        cpi     Nbt,    3 ; принято 3 байта?
        breq    wtR       ; да, к ожиданию символа 'R'
        cpi     Nbt,    4 ; принято 4 байта?
        breq    wtM       ; да, к ожиданию символа 'M'
        cpi     Nbt,    5 ; принято 5 байт?
        breq    wtC       ; да, к ожиданию символа 'C'
        rjmp    iReturn   ; к выходу из обработчика прерывания
;
wtId0:
        cpi     btgps,  $24 ; принят символ '$'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        rjmp    iretsv   байт для записи и выход из обработчика прерывания
wtG:
        cpi     btgps,  $47 ; принят символ 'G'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        rjmp    iretsv  ; байт для записи и выход из обработчика прерывания
wtP:
        cpi     btgps,  $50 ; принят символ 'P'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        rjmp    iretsv  ; байт для записи и выход из обработчика прерывания
wtR:
        cpi     btgps,  $52 ; принят символ 'R'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        rjmp    iretsv  ; байт для записи и выход из обработчика прерывания
wtM:
        cpi     btgps,  $4d ; принят символ 'M'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        rjmp    iretsv  ; байт для записи и выход из обработчика прерывания
wtC:
        cpi     btgps,  $43 ; принят символ 'C'?
        brne    iclret        ; нет, сброс счетчика и флагов и выход
        inc     Nbt           ; да, инкремент счетчика
        bitset flg, Rmc       ; установка флага 'заголовок принят'
        rjmp    iretsv  ; байт для записи и выход из обработчика прерывания
.Exit
```

Рисунок 2.11. Текст программы обработки сообщения RMC.

Третий фрагмент программы описывает процедуру обнуления счетчиков и флагов, описание команд завершения работы каждого обработчика прерывания, каждой процедуры.

На рисунке 2.11 демонстрируется текст программы, описывающий несколько процедур. Процедура ifZpt проверяет принятый символ на соответствие раздели-

телю; chkValid – признак корректности принятых данных позиционирования; ifEnd – принятие символа завершения сообщения. Далее описана основная процедура wtRMC. Она анализирует принятые символы заголовка сообщения на совпадение с данными RMC.

Подпрограмма обработчика будет работать до тех пор, пока сообщение RMC не будет принято полностью. Если сообщение принято в полном объеме, данные координат верны, тогда RMC-сообщение будет сохранено. Также считается количество принятых байт данных (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры, №5, 2014 г.).

Внутрисхемное решение сейсмического регистратора предполагает использовать встроенный блок «Часы» для привязки сейсмического события по временной оси. По данным технического паспорта «Регистр-3MS», уход по времени составляет 2 секунды в месяц. Обычно перед выходом на полевые работы для синхронизации «Регистр-3MS» подключается к PC. Таким способом компенсируется уход по времени.

Кроме определения координат местоположения, встроенный GPS модуль L10 позволяет решить вопрос синхронизации по времени, не прибегая к «периодическому подключению к PC».

Это стало возможным, благодаря широкому распространению систем GPS-тайминга и временной синхронизации в системах управления и контроля разнесенными объектами. Так как часы GPS-приемника с высокой точностью синхронизированы с часами спутников GPS после первого местоопределения, при этом шкала времени системы GPS соотнесена со шкалой универсального координированного времени (UTC – Universal Time, Coordinated), то GPS приемник можно использовать как источник высокоточной синхронизационной информации в любой точке Земли. Это простое и недорогое решение позволяет синхронизировать процессы измерений и поддерживать единое время в пространственно-разнесенных системах, например, в системах позиционирования (Бурдинский И.Н. Использование GPS-модулей в системах временной синхронизации // Вестник ТОГУ, 2010, №4(19)).

Таким образом, периодически обращаясь к L10, управляющий микроконтроллер выбирает из сообщения RMC сведения о точном времени и сопоставляет со временем в блоке «Часы». При расхождении значений времени, в блок «Часы» прописывается время, взятое из RMC сообщения. Уход по времени в «Регистр-3MS» был равен 2 секунды в месяц, что соответствует приблизительно 2,8 мс в час. Заданная точность составляет не более 10 мс. Значит, синхронизацию по времени необходимо проводить с частотой один раз в 3 часа.

В результате проделанной работы разработана макетная плата и отлажен механизм определения координат и точного всемирного времени. Внешний вид печатной платы приведен на рисунке 2.12.

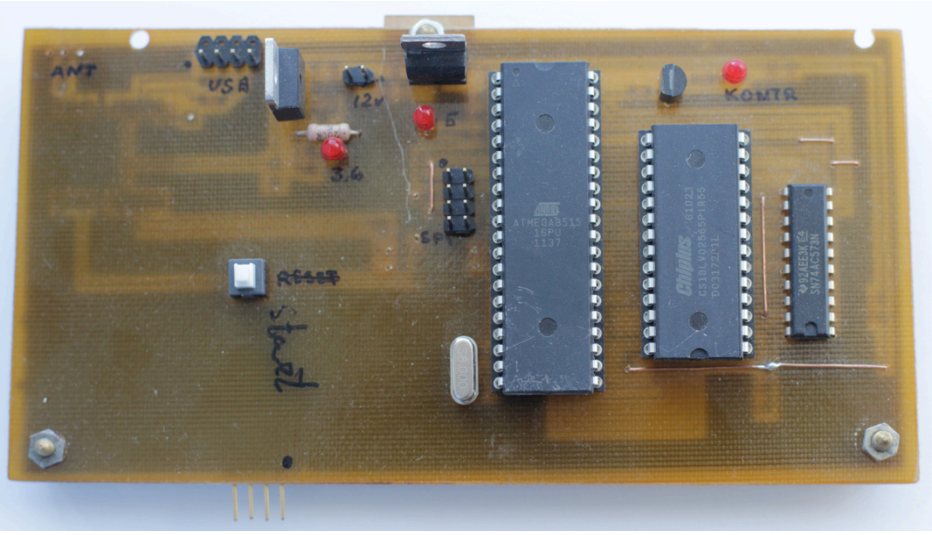

Рисунок 2.12. Печатная плата включения L10.

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 2.13. 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.

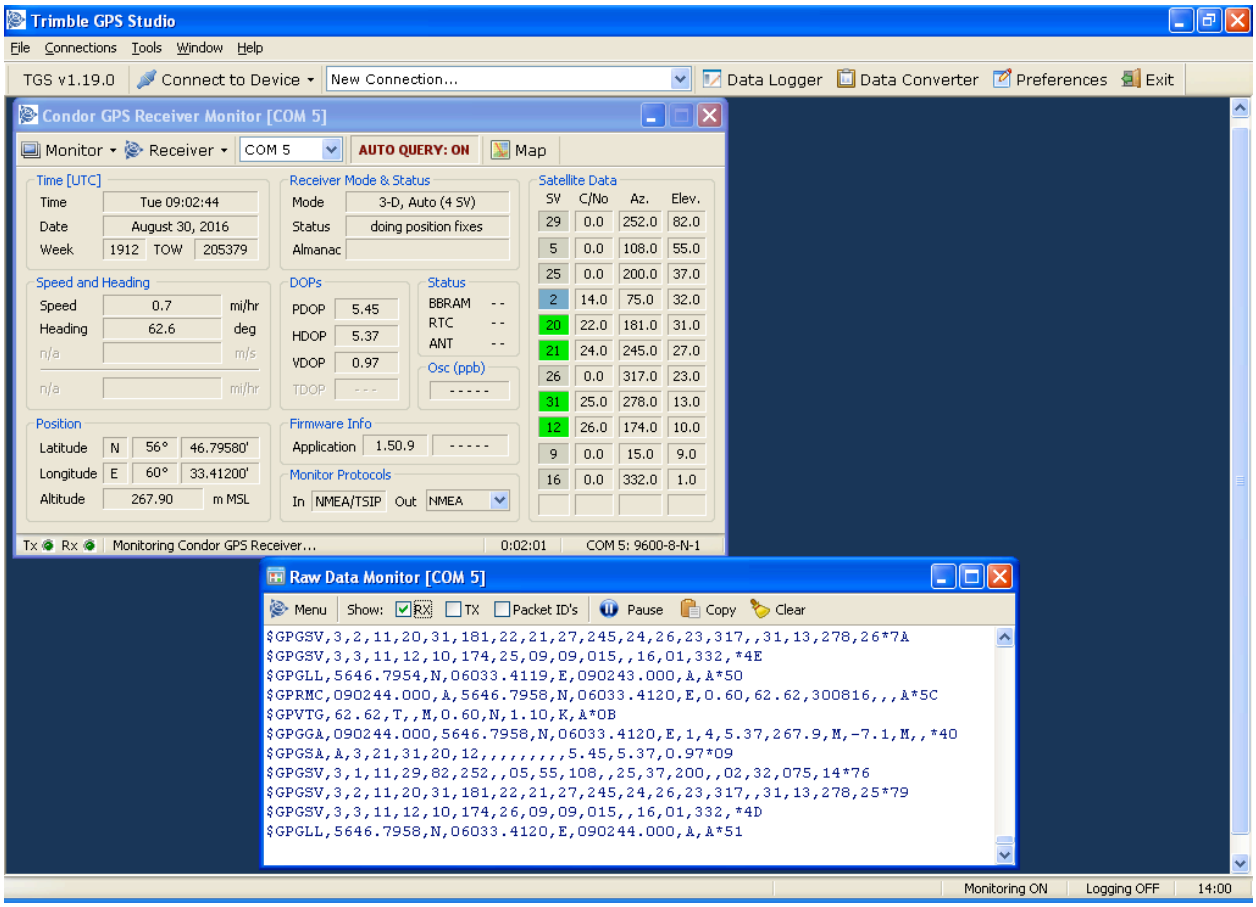

Рисунок 2.13. Интерфейс GPS-программы. Сообщения со спутника.

2.3. Расширенная память данных

Известно, что современный прибор, предназначенный для автономной регистрации сейсмических сигналов, например, «Регистр», в основном состоит из трех модулей:

- командный, в виде микроконтроллера, управляющего работой всех узлов системы;

- аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), обеспечивающий точность регистрации сейсмических сигналов;

- модуль, выполняющий функции записи и долговременного хранения больших объемов сейсмической информации в цифровом виде.

Конечно, «Регистр» имеет другие, существенные для его работы, блоки, такие, как модуль связи с компьютером, GPS-модуль, «часы» реального времени, блоки питания и т. п. Однако, именно три перечисленных выше модуля характеризуют прибор как автономное устройство, позволяющее длительное время записывать волновые формы сейсмических сигналов, сформированных микросейсмическим шумом, карьерными взрывами, техногенными и природными землетрясениями. В дальнейшем зарегистрированные сигналы передаются в компьютер, где проходят сложную процедуру обработки и интерпретации, в результате чего вычисляются статические и динамические характеристики сейсмических событий. (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры. 2016 г. № 4).

Как отмечалось ранее, основным командным или управляющим модулем в предыдущей версии регистратора являлся 8-разрядный контроллер общего назначения Atmega8515. Также следует отметить, что модуль хранения данных 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.

Архитектура контроллера Atmega8515 не предполагает прямого выхода на USB порт, но имеется два варианта передачи данных во внешние устройства. Во-первых, можно задействовать универсальный синхронно-асинхронный последовательный порт ввода/вывода UART (или USART), который может через тривиальный буферный повторитель напрямую подключаться к шине RS-232 компьютера. Во-вторых, имеется возможность передачи данных в параллельном виде, например, используя 8-разрядный порт ввода/вывода контроллера PA (Datasheet Atmega8515).

Рассматривая первый вариант с использованием последовательной шины UART, необходимо учитывать конфигурацию современных компьютеров, в частности, notebook, которые физически не имеют порта RS-232. Прямое использование 8-разрядной шины также затруднительно, поскольку придется обращаться к достаточно громоздкому порту компьютера – LPT (Line Print Terminet – параллельный порт). Простым решением является использование хорошо известных переходников USB – UART фирмы FTDI (Future Technology Devices Intl). В частности, второе поколение микросхем этой фирмы – FT232BM (Datasheet FT232BM) – широко зарекомендовало себя надежностью и стабильностью в работе, хорошим набором сервисных функций. На практике, данный мост в тандеме с контроллером Atmega8515 позволяет осуществлять обмен данными через последовательный асинхронный порт со скоростью 250 Кбод. Это неплохая скорость, но для случаев, когда требуется передать небольшой (в пределах 10...16 Мбайт) объем цифровых данных. Если же объем составляет сотни мегабайт, такая скорость неприемлема, поскольку передача будет длиться десятки минут, что в конечном итоге скажется на производительности работ (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и

контроллеры. 2015 г. № 2). Данный переходник был реализован в версии «Регистр-3MS».

Более скоростным вариантом мостов FTDI является микросхема серии FT245BL (Datasheet FT245BL). Она обеспечивает синхронный прием байта данных из внешнего устройства, в частности, считывание информации из порта А 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, а с байтом данных в единицу времени, скорость обмена должна возрасти, по меньшей мере, в 8 раз. На практике удалось получить скорость передачи данных в варианте использования моста FT245BL совместно с контроллером Atmega8515, равную 2,4 Мбод.

На рисунке 2.14 представлена принципиальная электрическая схема подключения USB моста FT245BL, реализующего процесс передачи данных из регистратора сейсмических сигналов «Регистр» в PC по интерфейсу USB.

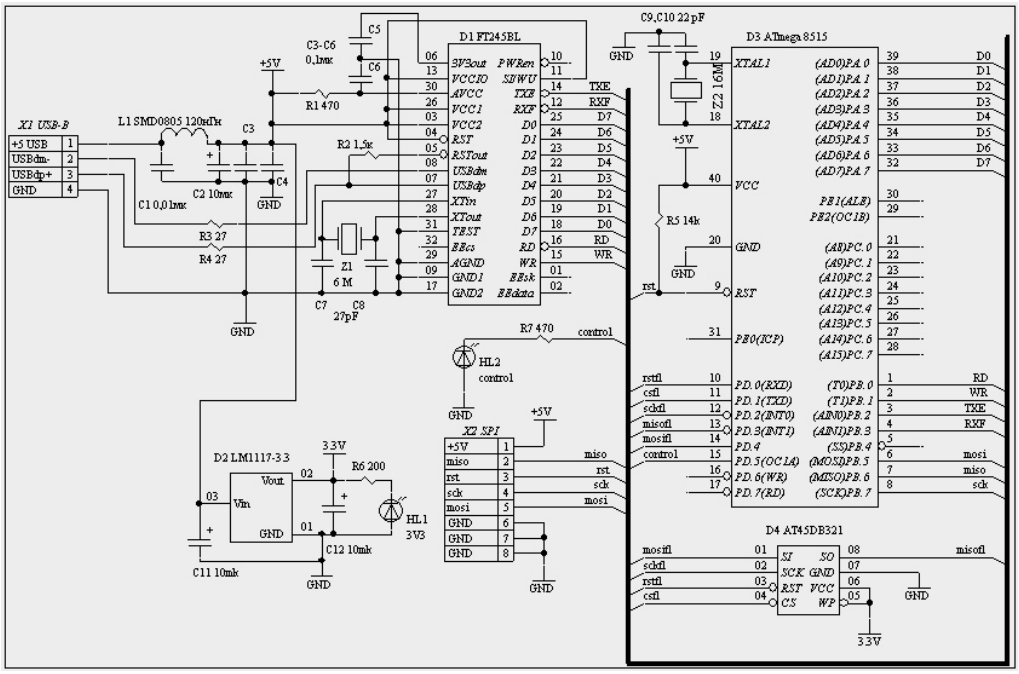

Рисунок 2.14. Принципиальная электрическая схема макетной платы подключения USB моста FT245BL к управляющему микроконтроллеру регистратора сейсмических сигналов «Регистр».

Представленная на рисунке 2.14 макетная плата позволяет на программном уровне реализовать задачу оперативной передачи накопленной информации из внутренней памяти регистратора в компьютер по каналу USB. Макет включает управляющий контроллер D3, мост FTDI – микросхема D1, энергонезависимую флэш память D4 емкостью 4 Мбайт, физически имитирующую реальный накопитель регистратора, источник питания 3,3 В для флэш памяти, выполненный на микросхеме D2. Все остальные микросхемы питаются напряжением 5 В, поступающим на плату через разъем X1 с шины USB.

Тактовый генератор моста FT245BL синхронизирован кварцевым резонатором Z1 частотой 6 МГц, а контроллер D3 – резонатором Z2 частотой 16 МГц. Разъем X2, установленный на плате, предназначен для внутрисистемного программирования микроконтроллера через линии PB.5 – PB.7. Линии контроллера PD0 – PD4 являются управляющими по отношению к флэш памяти D4, а линия PD5 обеспечивает контроль выполнения отдельных операций с помощью светодиодного индикатора HL2. Светодиод HL1 индицирует наличие напряжения питания 3,3 В. Параллельный двунаправленный порт A контроллера подключен к соответствующей параллельной шине моста FT245BL (линии D0 – D7). Основными управляющими сигналами микросхемы D1 являются сигналы RD (разрешение чтения байта из буфера FIFO), WR (запись внешнего байта в буфер передачи FIFO), TXE (запрет или разрешение записи байта в FIFO), RXF (запрет или разрешение чтения байта из FIFO). Перечисленные сигналы формируются и отслеживаются в линиях PB0 – PB4 микроконтроллера D3. Интерфейс USB подключается через разъем X1 к двунаправленным линиям входа/выхода моста FT245BL – USBdp и USBdm (выводы 07 и 08 микросхемы D1).

Рассмотрим подробнее основные принципы работы аппаратно-программного модуля, принципиальная электрическая схема которого показана на рисунке 2.14. Для удобства анализа работы используем функциональную схему, изображенную на рисунке 2.15.

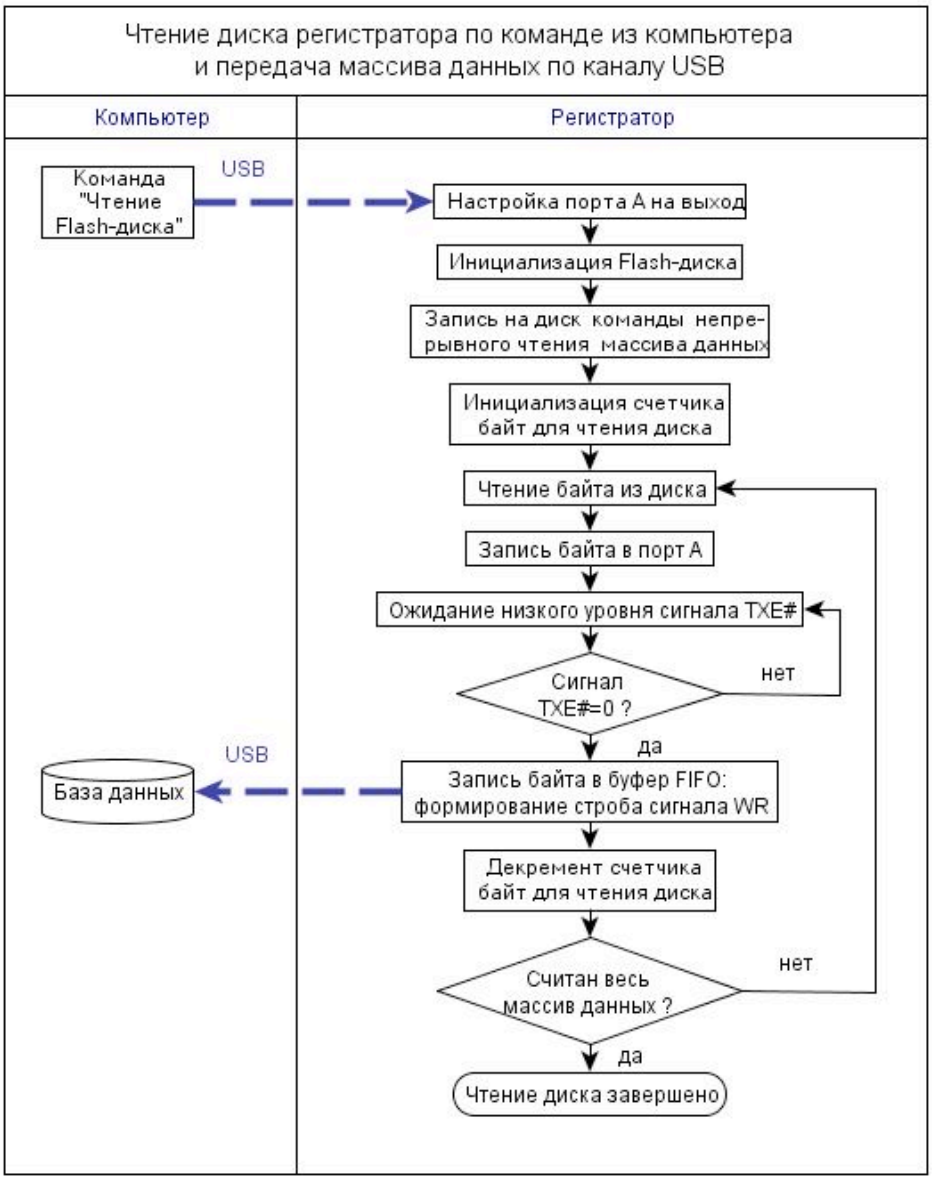

Рисунок 2.15. Алгоритм чтения данных из флэш– диска регистратора и передачи массива в компьютер по каналу USB.

Синими стрелками на схеме условно показан двунаправленный порт USB, через который совершается обмен информацией между регистратором и компьютером. Включением в работу данного алгоритма является команда «Чтение Flash-диска», поступающая в управляющий контроллер регистратора. В результате происходит настройка порта А на выход, инициализация флэш–диска командой непрерывного чтения массива данных, при этом активируется счетчик байт для чтения с диска. Далее начинается побайтное считывание информации и запись считанных байт в порт А контроллера D3 (рисунок 2.14).

С приходом низкого уровня управляющего сигнала TXE приемо-передающего моста D1, байт данных из порта A контроллера переписывается в буфер FIFO микросхемы FT245BL, причем для записи в этот буфер на выводе 2 контроллера D3 формируется строб записи WR, поступающий на вывод 15 микросхемы D1.

Следующей операцией является декрементация счетчика байт, считанных из флэш–памяти, и проверка соответствия объема считанных байт заданному объему массива данных. При совпадении этих значений программа завершает чтение диска и передачу данных в канал USB. В противном случае происходит возврат программы в точку «чтение байта из диска» и передача информации из диска в компьютер продолжается.

На рисунке 2.16 приведен упрощенный вариант подпрограммы чтения данных из флэш–памяти регистратора и передачи в компьютер по каналу USB с использованием параллельного FIFO моста FT245BL.

```
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
DskToPc:  ; Подпрограмма чтения диска регистратора по команде
          ; из компьютера и передача массива данных по каналу USB
        ser     wrk             ; Порт А настроить
        out     ddra,  wrk      ;   на выход.
        rcall   DskIni          ; Инициализация флэш-диска.
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
        ldi     lcmd,  5        ; Запись на флэш-диск
        ldi     dcm,  cRdArr    ;   команды непрерывного
        rcall   DoCmd           ;   чтения массива данных.
        ldi     cyh,   $42      ; Инициализация счетчика
        clr     cyl             ;   байт для чтения диска.
nxbkc:
        rcall   DskRdBt         ; Чтение байта из диска.
        out     porta, dcm      ; Запись байта в порт А.
nxTxe0:
        sbic    pinb,  oTXE     ; Ожидание низкого уровня
        rjmp    nxTxe0          ;   сигнала TXE#.
        cbi     portb, oWR      ; Формирование строба сигнала WR
        sbi     portb, oWR      ;   и запись байта в буфер FIFO.
;       dec     xl              ; Декремент счетчика байт
        brne    nxbkc           ;   для чтения диска и проверка
        sbiw    cyl,    1       ;   его на нулевое значение для
        brne    nxbkc           ;   завершения передачи.
rldds2:
        sbi     portd, oCSdsk   ; Отключение флэш-диска.
        ret                     ; Выход из подпрограммы
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
```

Рисунок 2.16. Подпрограмма чтения данных из памяти регистратора и передачи этой информации в компьютер по каналу USB.

Как видно из рисунка 2.16, в представленном программном блоке, отлаженном для управляющего контроллера Atmega8515, полностью отражены все этапы алгоритма, описанного выше и изображенного на рисунке 2.15 (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры. 2015 г. № 2).

Внутрисистемное программирование и настройка описанного в настоящей работе аппаратно-программного модуля осуществлялись в оболочке AVR Studio4. По завершении отладки макетной платы полученные аппаратно-программные решения были перенесены в действующий экземпляр регистратора сейсмических сигналов «Регистр», проведены лабораторные и полевые испытания прибора, в результате которых удалось добиться скорости обмена данными регистратора с компьютером по каналу USB 2,4 Мбод. Это обеспечило время чтения флэш диска емкостью 100 Мбайт за 5,5 минут. Данный результат показывает, что скорость обмена данными возросла в десять раз. Сравнивая с предыдущей версией регистратора, при одинаковом времени передачи данных, объем диска может быть увеличен в 10 раз.

Практическая реализация применения переходника FT245 представлена в виде макетной платы. Внешний вид разработанной печатной платы приведен на рисунках 2.17а и 2.17б.

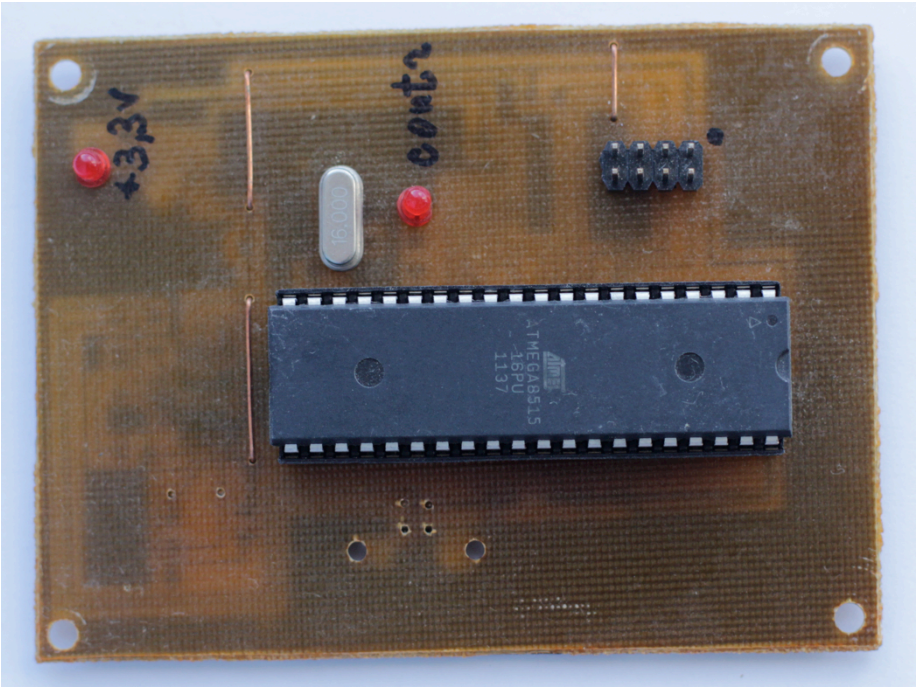

Рисунок 2.17. Печатная плата включения переходника FT245.

К моменту реализации поставленной задачи 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.

Рассмотрим техническую часть решения поставленной задачи, которая состоит из подключения контроллера к карте, модулю программирования, источникам питания и т. п. Прежде всего, следует отметить, что разновидности SD карты могут работать в двух режимах (Industrial Grade SD & SDHC Memory Cards, August 2012) – SPI (Serial Peripheral Interface – последовательный периферийный интерфейс) и SD (Secure Digital – надежная цифровая [память]). Поскольку управляющим контроллером в регистраторе «Регистр» является 8-разрядный контроллер AVR (Datasheet Atmega64), который не имеет аппаратной поддержки SD режима, был выбран режим работы карты SPI. Собственно, различие этих режимов заключается главным образом в том, что в режиме SPI обмен данными с внешним устройством происходит последовательно однобитовым потоком, а в режиме SD – параллельно, тетрадами бит. В таблице 2.6 приведено назначение контактов карты в режиме SPI.

Таблица 2.6. Назначение контактов карты в режиме SPI

№ контакта	**Имя**	**Описание**
1	CS	Chip Select (выбор микросхемы)
2	DI	Data Input (входные данные)
3	GND	Ground («Земля», общий провод)
4	VCC	Voltage CC (плюс питания)
5	SCLK	Serial Clock (последовательный тактовый сигнал)
6	GND	Ground («земля», общий провод)
7	DO	Data Output (выходные данные)
8	NC	No connect (нет соединения)
9	NC	No connect (нет соединения)

На рисунке 2.18 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.

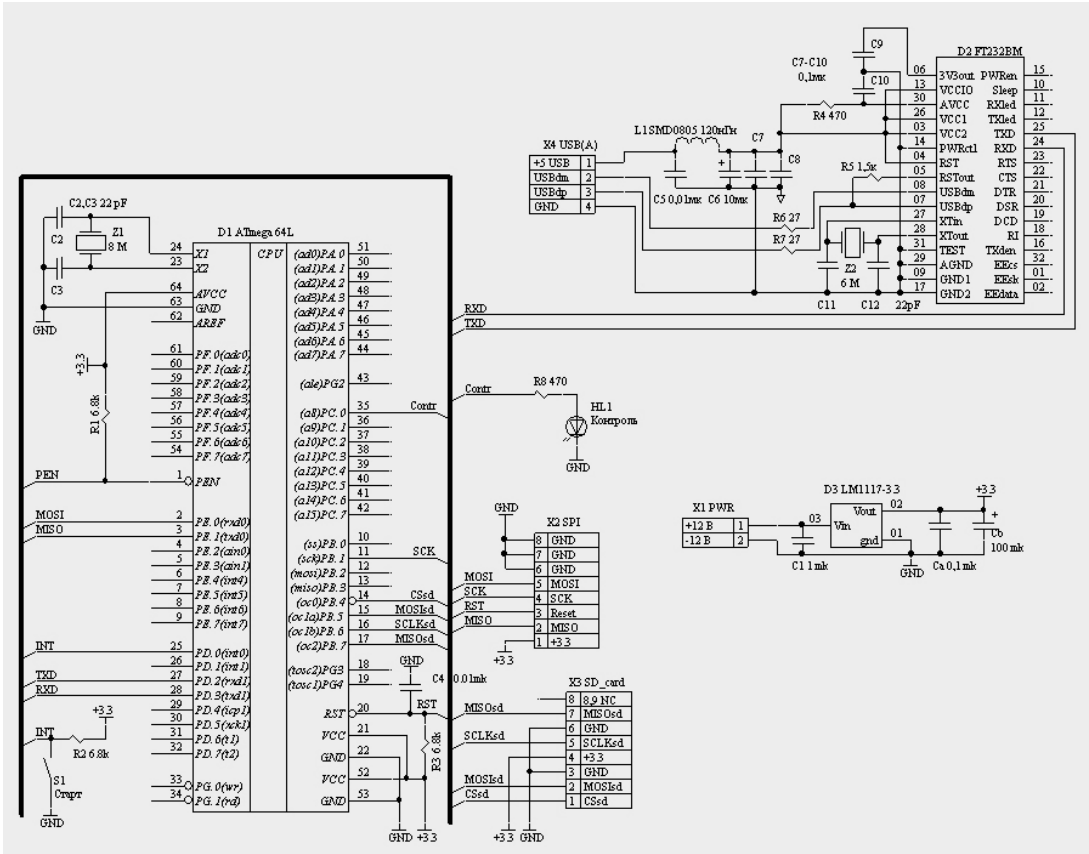

Рисунок 2.18. Принципиальная электрическая схема отладочного модуля записи - чтения цифровых данных на SDHC карту памяти.

В отладочном модуле применен 8-разрядный RISC контроллер ATmega 64L фирмы Atmel (на рисунке микросхема D1), устойчиво работающий при пониженном напряжении питания (3 – 3.3 В) и частоте кварцевого резонатора Z1 8 МГц (Datasheet Atmega64). Это позволило исключить дополнительные элементы согласования между контроллером и картой, поскольку она рассчитана на такие же уровни питающего напряжения. Источник питания выполнен на элементе D3. Функцию обмена данными с компьютером по каналу USB выполняет микросхема D2. Эта функция необходима для отладки программы управления и записи/чтения информации на карту SDHC, подключаемую к разъему X3. Через разъем X2 осу-

ществляется программирование контроллера D1, а через разъем X4 – обмен данными с компьютером. Кнопка S1 служит для аппаратного формирования команды «старт записи/чтения на карту» по прерыванию INT. Поскольку в работе рассматривается схема отладочного модуля (рисунок 2.18), в нем предусмотрено наличие светодиодного индикатора HL1 «Контроль». С помощью индикатора можно фиксировать выполнение (или невыполнение) отдельных фрагментов программы, что удобно при настройке модуля.

Поскольку основная цель – это запись больших объемов сейсмической информации на стандартную SDHC карту, логично будет определиться с форматом записи, который без каких-либо дополнительных преобразований будет восприниматься любым современным персональным компьютером. Правильно будет использовать наиболее распространенную в настоящее время файловую систему записи и хранения данных в компьютере, одним из основных элементов которой является таблица размещения файлов с известной аббревиатурой FAT (File Allocation Table) (Мешков Владимир. Архитектура файловой системы FAT // Системный администратор. № 2(15), 2004 г.). Как отмечалось выше, карта памяти SDHC имеет формат записи FAT32, поэтому рассмотрим его более подробно. Расположение областей в файловой системе FAT32 показано в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Расположение областей в файловой системе FAT32

Загрузочная область	Структура FSInfo	Резервная область	FAT1	FAT2	Область данных

Загрузочная область. Данная область содержит информацию о типе носителя и его главных параметрах.

Структура FSInfo. Эта структура содержит информацию о количестве свободных кластеров на диске и о номере первого свободного кластера в таблицах FAT.

FAT1 и FAT2. Эти разделы содержат информацию о расположении файлов на носителе.

Рассмотрим обобщенный алгоритм работы программной части регистратора «Регистр», составной частью которого является обслуживание SDHC карты. Такой алгоритм в виде блок-схемы приведен на рисунке 2.19.

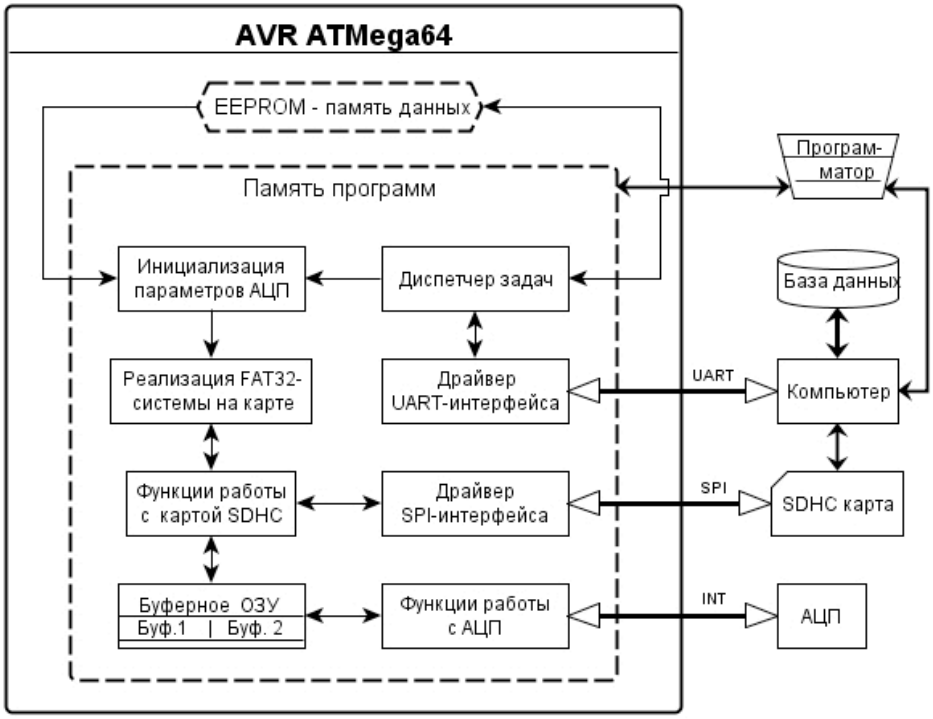

Рисунок 2.19. Обобщенный алгоритм работы программной части регистратора «Регистр», составной частью которого является обслуживание SDHC карты.

Поскольку в состав прибора «Регистр» входят другие элементы, также частично связанные либо с управляющим контроллером, либо с картой памяти, в описательной части возникает необходимость обращения к этим элементам прибора.

Как видно из рисунка 2.19, ядром схемы является контроллер AVR Atmega64, в состав которого физически входят память данных EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory – электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство), память программ (Flash Memory – разновидность EEPROM), буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) SRAM (Static Random Access Memory - статическая память с

произвольным доступом), причем буферное ОЗУ разбито на 2 буфера емкостью 512 байт каждый.

Прежде всего, диспетчер задач осуществляет связь регистратора с компьютером посредством драйвера UART интерфейса (Universal Asynchronous Receiver Transmitter – универсальный асинхронный приемопередатчик), инициализацию параметров аналого-цифрового преобразования (АЦП) и функции работы с АЦП – устройством, входящим в состав регистратора, например, как это описано в (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры. 2015 г. № 7). После инициализации параметров АЦП программа контроллера переходит к созданию рабочего файла в системе FAT32 на карте памяти SDHC, ее рабочим функциям, а также формирует драйвер SPI интерфейса для аппаратного взаимодействия с картой памяти.

Необходимым внешним элементом, присутствующим в блок-схеме (рисунок 2.19) является программатор, напрямую связывающий компьютер с памятью программ контроллера. Связь сформирована с помощью второго интерфейса SPI (на блок-схеме не показано). Отлаженные фрагменты программы с помощью программатора загружаются в программную область контроллера и обеспечивают корректную работу всех элементов регистратора сейсмических сигналов, в том числе модуля записи-чтения цифровых данных на SDHC карту памяти.

В общем виде работу программы записи информации на карту можно описать следующим образом. Выборки цифровых данных снимаются из АЦП по прерыванию микроконтроллера и заносятся непрерывным потоком в буферное ОЗУ, разделенное на две равные части - для накопления информации и для ее записи на карту. Размер буфера составляет 512 байт и совпадает с размером стандартного сектора SDHC карты.

По заполнении буфера накопления (Буф.1 на рисунке 2.19) происходит перенаправление потока данных во второй буфер (Буф.2), который первоначально был свободен. Если рассматривать общий цикл работы, то он становится свободным после каждой перезаписи данных из него в карту памяти. Для предотвращения потери информации из АЦП необходимо соблюдать два условия: во-первых, в

главном цикле программы постоянно отслеживать флаг прерывания, во-вторых, время записи сектора карты (512 байт) не должно превышать время накопления буфера «Буф.1». Это означает, что при записи сектора происходит прерывание для снятия нового показания из АЦП, после чего возобновится прерванный процесс записи. Временные характеристики карты для SPI интерфейса (Industrial Grade SD & SDHC Memory Cards) позволяют сделать перерыв в процессе записи, так как физически карта остается постоянно включенной, т. е. управляющий сигнал CS карты не изменяется.

Далее рассмотрим фрагмент программного обеспечения (ПО) штатного контроллера регистратора сейсмических сигналов, алгоритм работы которого обеспечивает корректное функционирование SDHC карты в составе прибора. Для большей наглядности представим данный фрагмент в виде блок схемы, изображенной на рисунке 2.20.

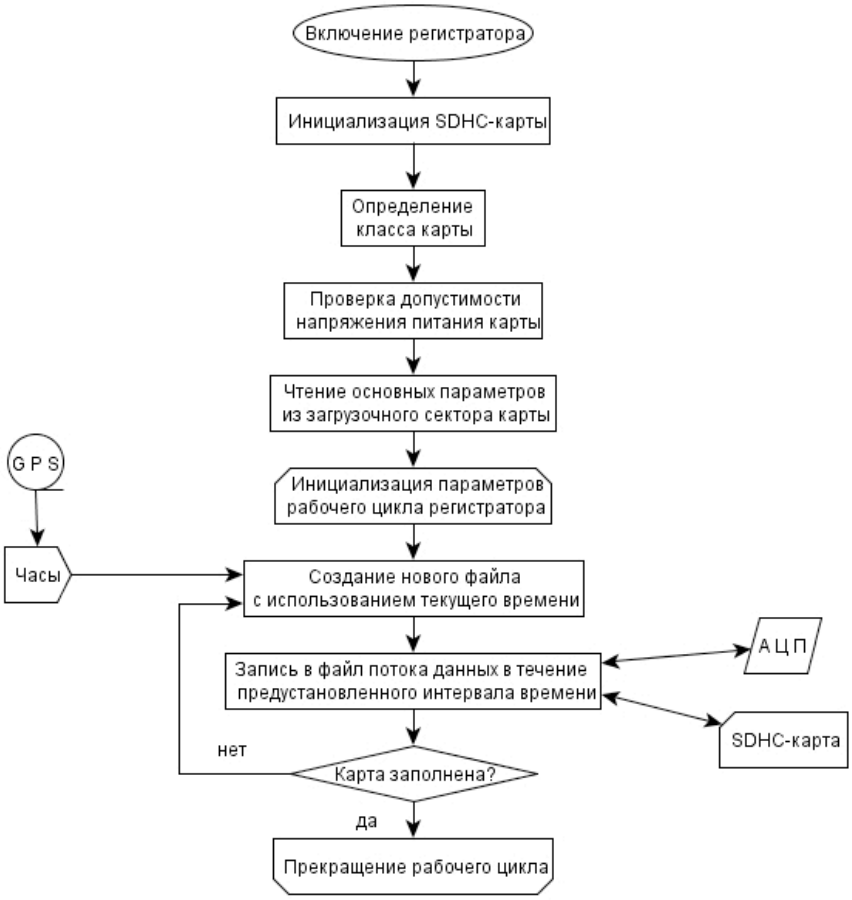

Рисунок 2.20. Блок-схема фрагмента ПО, обеспечивающего работу SDHC карты в составе сейсмического регистратора «Регистр».

После включения прибора ПО осуществляет инициализацию SDHC карты, в которую входит, в частности, формирование интерфейса SPI с целью обмена данными с контроллером. Далее определяется класс карты и проверяются допуски питающего напряжения. После чтения основных параметров из загрузочного сектора карты происходит инициализация параметров рабочего цикла регистратора. Создается новый файл для записи на SDHC карту, при этом из GPS приемника, входящего в состав прибора, считывается текущее время и организуется блоковый поток данных из АЦП, которые записываются на карту. Как видно из рисунка 2.20, последняя процедура является цикличной по отношению к операции проверки заполнения карты. В случае, если на карте есть свободное пространство, программа повторяет создание нового файла записи на SDHC карту очередного блока данных из АЦП. Если же карта заполнена, ПО завершает рабочий цикл регистратора, при этом контроллер ожидает внешней управляющей команды.

На рисунке 2.21 показан фрагмент программы контроллера на языке C++, который осуществляет стартовую инициализацию SDHC карты памяти.

Каждая строка представленного на рисунке 2.21 фрагмента содержит необходимые комментарии. Фрагмент состоит из четырех блоков, каждый из которых начинается подачей соответствующей команды инициализации карты (на рисунке выделены желтым цветом). Первая команда обеспечивает перевод карты в режим SPI. В блоке программы после второй команды происходит определение версии карты, проверка ее рабочего состояния и перевод в режим ожидания. Третья команда подключает карту к источнику питания, т. е. переводит устройство из режима ожидания в рабочий режим. В последнем блоке инициализации после четвертой команды анализируется тип карты. Происходит определение SDHC типа, с которым возможна работа. Если тип карты не совпадает с установленным, программа инициализации прерывается по причине несовместимости (Сенин Л.Н. и др. Промышленные АСУ и контроллеры. 2016 г. № 4).

```
//*********************************************************************
//Функция: инициализации SDHC-карты в SPI режиме.  //Аргументы: нет.
// Инициализация внешних переменных типа unsigned char: flagSDHC и cardType.
//Возврат: 0 - если нет ошибок:   другое, если есть ошибки
//*********************************************************************
unsigned char sdIni(void) {
   unsigned char i, response, sdVersion, status; /* внутренние  переменные */
   unsigned int retry = 0;      /* обнулить счетчик для таймаута */
      for ( i = 0; i < 10; i++ ) /* организация обязательного цикла: */
         sdWrByte(0xff);  /* подать 80 импульсов SCLK для инициализации карты */
      /*  Подача 1-й команды инициализации карты */
      do { /* после выполнения  команды  CMD0 = "сброс карты" происходит  */
         response = sdCmd(GO_IDLE_STATE, 0); /*  переход карты в режим SPI */
         retry++;  /* инкремент счетчика для выявления таймаута */
         if ( retry > 0x20 ) /*  таймаут превышен, карта не обнаружена */
            return 1;         /* выход по таймауту, возврат = 1 */
      } while(response != 0x01);   /* повторять, пока карта не  " проснётся " */
      /*  Подача 2-й команды инициализации карты */
      retry = 0;          /* обнулить счетчик для таймаута */
      sdVersion = 2;  /* по умолчанию версия карты равна 2, анализ результата */
                      /*  следующей  команды может изменить её  */
      do { /*  CMD8  = "проверка  рабочего состояния интерфейса и диапазона */
         response = sdCmd(SEND_IF_COND, 0x000001AA);   */ напряжения питания " */
         retry++; /* инкремент счетчика для выявления таймаута */
         if ( retry > 0xfe ) {  /* таймаут превышен */
            sdVersion = 1;   /* карта версии 1  */
            cardType = 1;    /* передача значения внешнему параметру программы */
            break;  /* прервать программу из-за несовместимости с версией карты */
         }  /* конец обработки таймаута */
      } while (response != 0x01); /*ожидание состояния карты  =  в режиме ожидания */
      /*  Подача 3-й команды инициализации карты */
      retry = 0; /* обнулить счетчик для таймаута */
      do { /* команда  ACMD41 подключит карту к питанию, т.е. переведёт её из  режима
            /* ожидания в рабочий режим */
         response = sdCmd(APP_CMD, 0); /* CMD55 обязательна перед командой Acmd */
         response = sdCmd(SD_SEND_OP_COND, 0x40000000); /* команда ACMD41 */
         retry++;  /*  инкремент счетчика для выявления таймаута */
         if ( retry > 0xfffe ) /* таймаут превышен, ошибка подключения карты к питанию*/
            return 2;  /* выход по таймауту, возврат = 2 */
      } while ( response != 0x00 );  /* ожидание правильного ответа готовности карты */
      /*  Подача 4-й команды инициализации карты, анализ типа карты */
      retry = 0;          /* обнулить счетчик для таймаута */
      flagSDHC = 0;  /* по умолчанию значение флага для карты типа SD */
      if (sdVersion == 2) {  /*  для карты версии 2  */
         do { /*  CMD58 – команда для чтения содержимого регистра OCR,   повтор  */
            response = sdCmd(READ_OCR, 0);  /*  CMD58 в цикле в рамках  таймаута */
            /*  при выполнении CMD58 происходит чтение и анализ содержимого регистра
            /* OCR: если ( биты 31..24 = 0x40), то flagSDHC = 1, иначе flagSDHC = 0 */
            retry++; /* обнулить счетчик для таймаута */
            if ( retry > 0xfe ) {  /* таймаут превышен */
               cardType = 0;    /*   карта типа SD  */
               break;  /* прервать программу из-за несовместимости с версией карты */
```

Рисунок 2.21. Фрагмент ПО стартовой инициализации SDHC карты памяти на языке СИ++.

Разработка проведена в виде макетной отладочной платы. Внешний вид печатной платы приведен на рисунке 2.22.

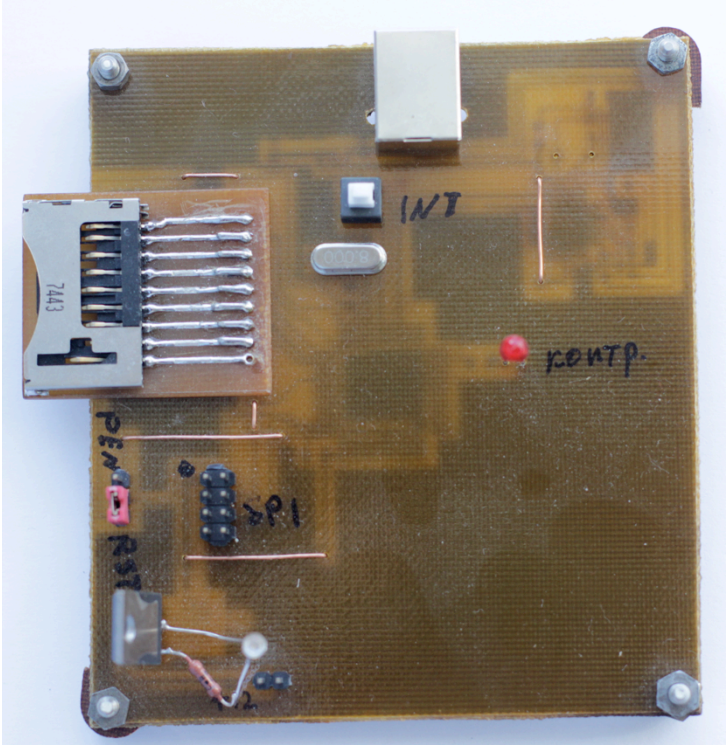

Рисунок 2.22. Печатная плата включения SDHC карты.

В заключении следует сказать, что использование миниатюрной SDHC карты в составе автономного сейсморегистрирующего прибора «Регистр» позволило значительно расширить его технические возможности. В частности, увеличить время непрерывной записи сейсмических сигналов в автономном режиме до нескольких месяцев, при этом перевести АЦП из 16-разрядного режима преобразования в 24-разрядный, что на 30% увеличило плотность цифрового потока данных при записи на карту памяти.

Внесенные изменения в «Регистр» не только позволили увеличить объем записи сейсмических данных и скорость передачи данных в PC, но также позволили использовать данный прибор в сейсмологических исследованиях с большей эффективностью.

Подводя итоги согласно поставленным задачам, перечислим основные результаты исследований:

1. Изучена базовая модель прибора «Регистр-3MS». Проведен сравнительный анализ аналогичных приборов.
2. Заменен управляющий контроллер с Atmega8515 на Atmega64.
3. На уровне макетной платы отлажен механизм работы GPS-модуля L10 для определения координат и точного всемирного времени.
4. Сокращено время обмена данными между регистратором и PC, с помощью USB моста FT245.
5. Реализован механизм записи и долговременного хранения большого объема данных, посредством введения в систему SDHC карты.

Разработаны аппаратные модули для полевой микроконтроллерной сейсморегистрирующей системы «Регистр», предназначенной для оперативного сейсмодинамического контроля, обеспечивающие высококачественные параметры хранения и передачи данных в компьютер, автоматического позиционирования точки установки прибора, а также определения точного всемирного времени.

Считаю, что первое защищаемое положение реализовано полностью.

Глава 3. Новые программные модули «Регистр»

В предыдущих главах данной 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, о чем подробно рассказано ранее. 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.

Базовая версия пользовательского интерфейса включает в себя основные функции (рисунок 3.1):

1. Подключение к «Регистру» через виртуальный COM порт, реализация передачи данных и запись на PC.
2. Организация структуры папок на PC.
3. Просмотр сейсмограммы.
4. Отражение общей информации по конкретной сейсмограмме (этикетка).
5. Выбор КЭМС датчика (коэффициент электромеханической связи).
6. Расчет спектра из файла.

Далее приведем непосредственно изображение основной формы программы и более подробно остановимся на каждой из функций ПО.

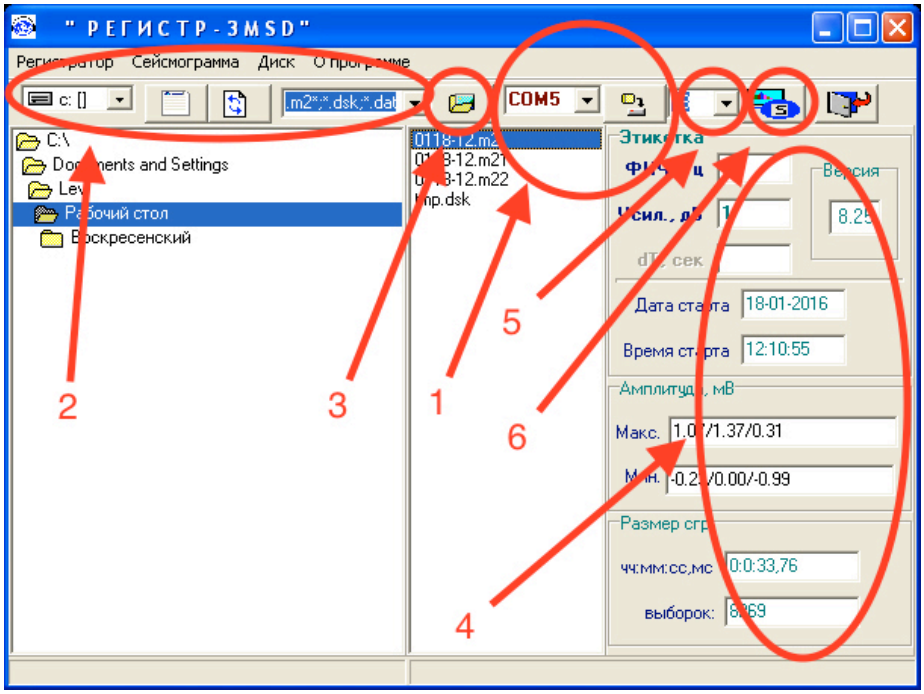

Рисунок 3.1. Изображение основной формы ПО.

Настройка подключения по виртуальному COM порту в Delphi реализована стандартными средствами. На форме имеется выпадающий список с возможностью выбора COM порта. Физически подключение реализовано по USB порту, через переходник FTDI. Ранее было подробно описано использование переходника FT232, а затем переход к FT245. Это самостоятельные законченные аппаратно-программные модули, которые поставляются с соответствующими драйверами. При подключении к PC драйвер переходника FTDI создает виртуальный COM порт, номер которого необходимо выбрать из выпадающего списка.

Каталогизация, расположение выгруженных файлов настроены стандартными средствами Delphi для работы со структурой папок в среде Windows. Присутствует возможность выбора диска, создания новой папки, обновления данных в папке и выбор конкретных файлов по расширению.

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.

Выбор КЭМС реализован в виде выпадающего списка, так как регистратор может работать с различными электродинамическими датчиками, преобразующими механические колебания в электрические сигналы. Основной характеристикой электродинамического датчика является коэффициент электромеханической связи или коэффициент преобразования (Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Сейсмоприемник низкочастотный трехкомпонентный СК-1П), который вычисляется по формуле (3.1).

$$K_{пр} = (1{,}41 * U_{эфф} * 10^3) / 2\pi * f * A \qquad (3.1)$$

где

$K_{пр}$ – КЭМС, В*с/м;

$U_{эфф}$ – эффективное значение выходного сигнала, снимаемого с сейсмоприемника, В;

f – частота, на которой проводят измерение, Гц;

A – амплитуда колебания инерционной массы сейсмоприемника, мм.

Также на основной форме реализована возможность отобразить спектр из файла. Это сделано для удобства оператора. Так как расчет спектра занимает достаточно много времени, после чего результат записывается в файл, при большом объеме обрабатываемой информации намного проще не пересчитывать спектр заново, а построить его из файла по уже просчитанным данным.

К реализованным ранее модулям стоит отнести форму настройки регистратора при подключении к PC, изображенную на рисунке 3.2. В левой части формы расположена установка календаря и часов, выбор ФНЧ, усиления, режима работы («Поток»), а также возможность отключения чипа «часы». В правой части – кон-

троль чтения данных с диска регистратора, общие сведения о состоянии диска, а также возможность отформатировать диск.

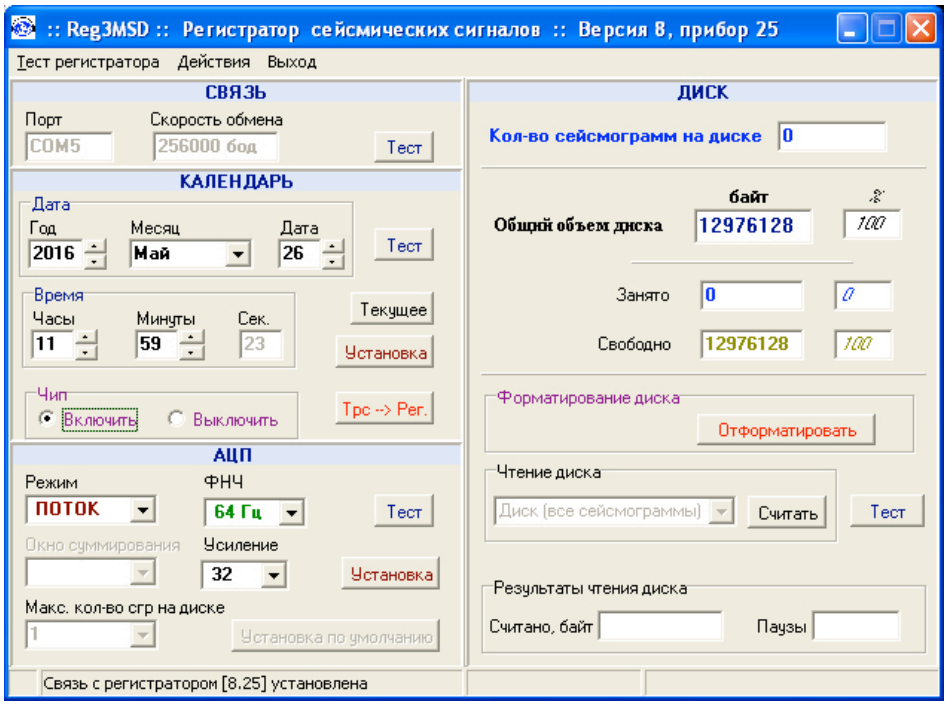

Рисунок 3.2. Изображение формы настройки регистратора.

Основной измеряемой и вычисляемой величиной сейсмодинамических характеристик является частота собственных колебаний объекта. Определить ее можно, применив спектральный анализ к фрагменту сейсмической записи (отдельно взятая сейсмограмма). Максимум спектра находится именно на частоте собственных колебаний (Давыдов А.В. Методические указания к лекциям. Цифровая фильтрация информации).

Для того, чтобы вычислить спектр, необходимо реализовать в программе фильтр нижних частот (ФНЧ) и фильтр верхних частот (ФВЧ). Ниже приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) данных типов фильтров рисунок 3.3 и рисунок 3.4. (Хемминг Р.В., Потапов О.А. Цифровые фильтры.), где по оси абсцисс расположена частота, по оси ординат – передаточная функция фильтра. ПП – полоса пропускания. ПЗ – полоса задержки или полоса непропускания

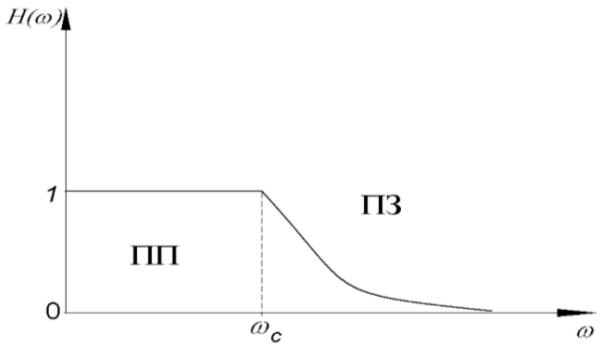

Рисунок 3.3. АЧХ ФНЧ.

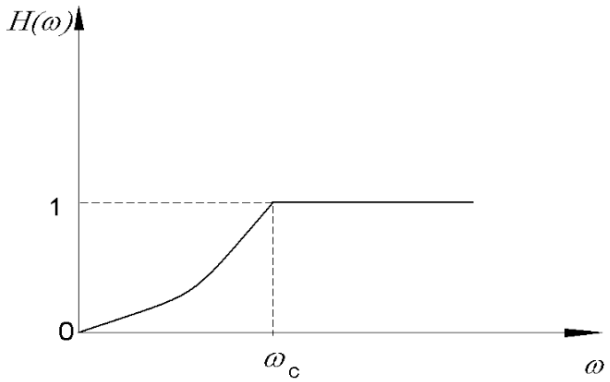

Рисунок 3.4. АЧХ ФВЧ.

ω_c – это частота среза. Физический смысл ФНЧ в том, что он не пропускает сигнал с частотой, выше частоты среза, а ФВЧ – сигнал с частотой, ниже частоты среза. Совокупность использования ФНЧ и ФВЧ в результате дает полосовой фильтр (ПФ). АЧХ ПФ указана на рисунке 3.5.

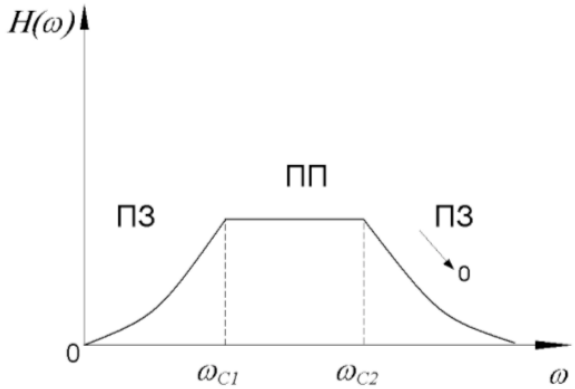

Рисунок 3.5. АЧХ ПФ.

Визуализация работы полосового фильтра приведена на рисунке 3.6а (фрагмент сейсмограммы до применения полосового фильтра, «галочка снята») и на рисунке 3.6б. (после применения полосового фильтра, «галочка установлена»). Непосредственно в программе 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.

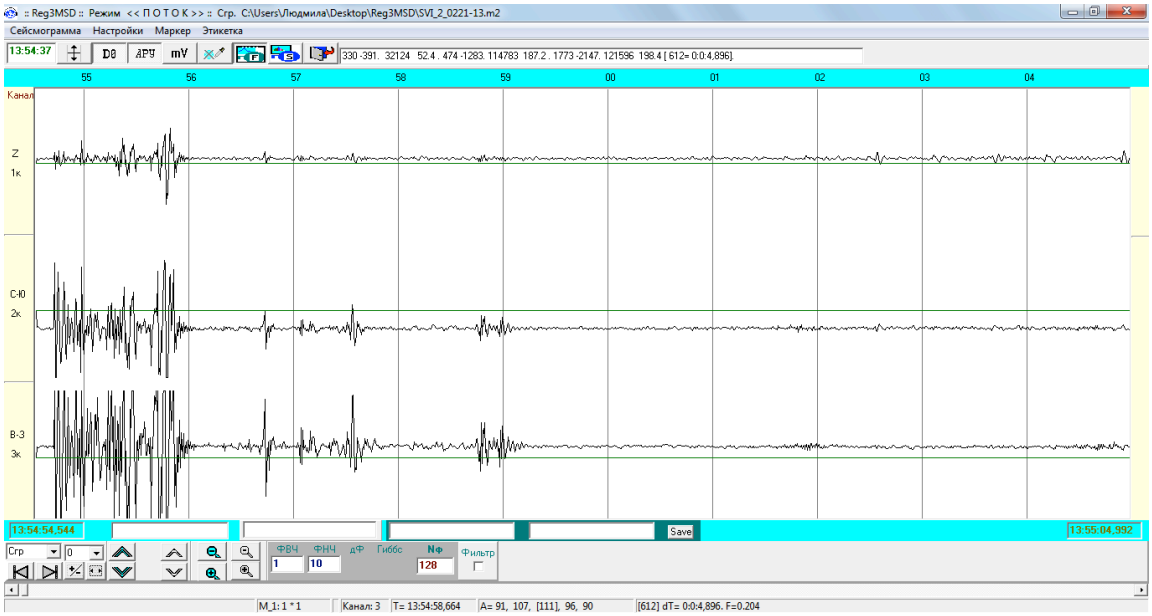

Рисунок 3.6а. Фрагмент сейсмограммы до применения фильтра.

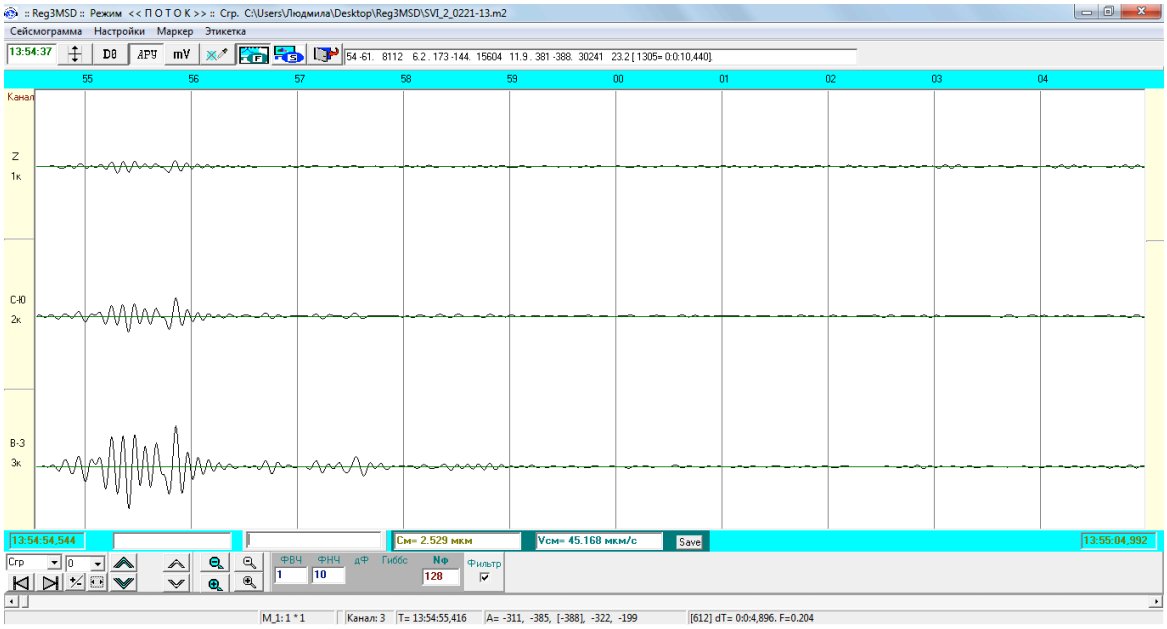

Рисунок 3.6б. Фрагмент сейсмограммы после применения фильтра.

Формула для вычисления смещения – это формула расчета КЭМС (3.1), где А – это амплитуда колебания инерционной массы сейсмоприемника. Зная коэффициент преобразования (величина, взятая из паспорта сейсмоприемника), на конкретной частоте в каждый момент времени есть возможность измерить уровень напряжения на выходе сейсмоприемника. Значит, можно вычислить амплитуду колебания инерционной массы сейсмоприемника. Это и есть амплитуда смещения.

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 3.7.

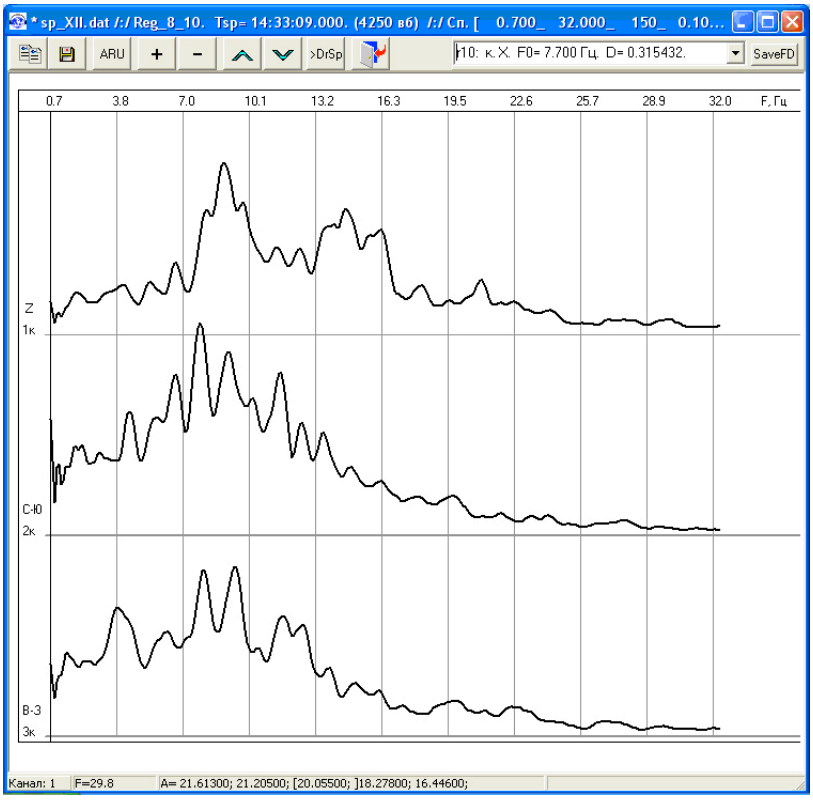

Рисунок 3.7. Спектр фрагмента сейсмической записи.

В правом верхнем углу рисунке 3.7 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.

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.

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

Считаю, что второе защищаемое положение реализовано полностью.

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. Далее приведены два примера из проведенных полевых работ. Графики и диаграммы использованы выборочно, по согласованию с заказчиками работ.

Обследования промышленных объектов на территории «Первоуральского новотрубного завода» проводились в 2011 году с целью оценки текущего состояния зданий, взаимного влияния соседних построек, а также возможного влияния строительных и ремонтных работ на сооружения. В работе использовались четыре прибора «Регистр» в комплекте с датчиками СК-1П. На рисунке 4.1 изображены внешний вид объекта и профили измерений.

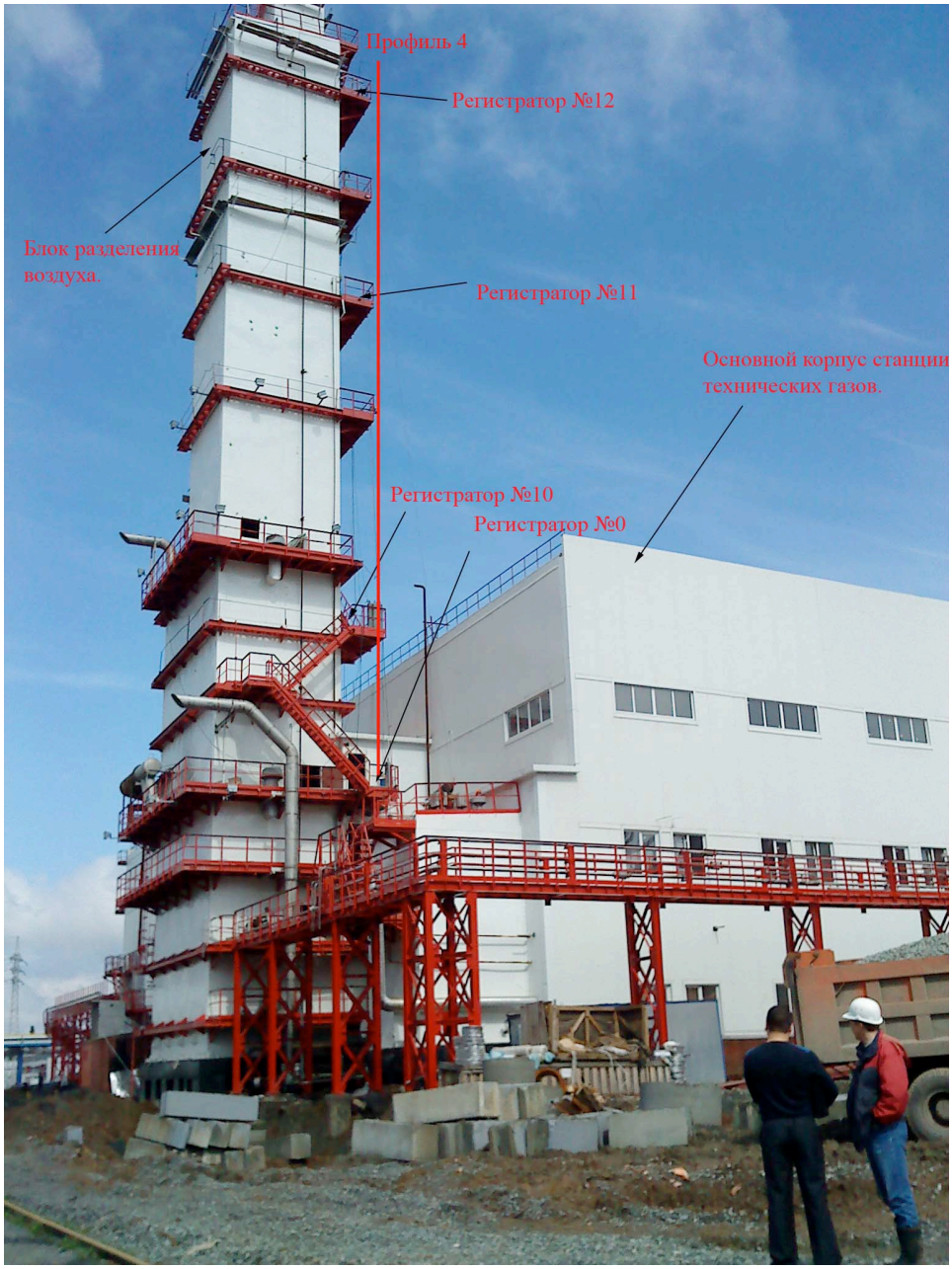

Рисунок 4.1. Внешний вид объекта (Сенин Л.Н. и др. Исследование сейсмодинамических характеристик строительных объектов с использованием регистратора сейсмических сигналов «Регистр». Электронный журнал «Архитектон»).

Методический блок комплекса сейсмодинамических исследований включает, во-первых, предварительную оценку сооружения с целью наиболее адекватного выбора точек размещения регистраторов. Приоритетными, как правило, являются точки, расположенные в верхней части объекта (крыша или чердачное помещение), его средней части и в основании. Во-вторых, следует оптимизировать такие параметры, как время непрерывной записи в каждой точке наблюдения, частот-

ный диапазон регистрации, коэффициент усиления. Эти параметры устанавливаются на основании коротких (1-2 минуты) пробных записей в нескольких точках объекта исследований. Из опыта работ в данной области, можно сказать, что времени регистрации 15-20 минут в одной точке измерения обычно достаточно для правильного определения сейсмодинамических характеристик объекта исследований. На рисунке 4.2 приведен пример расположения приборов.

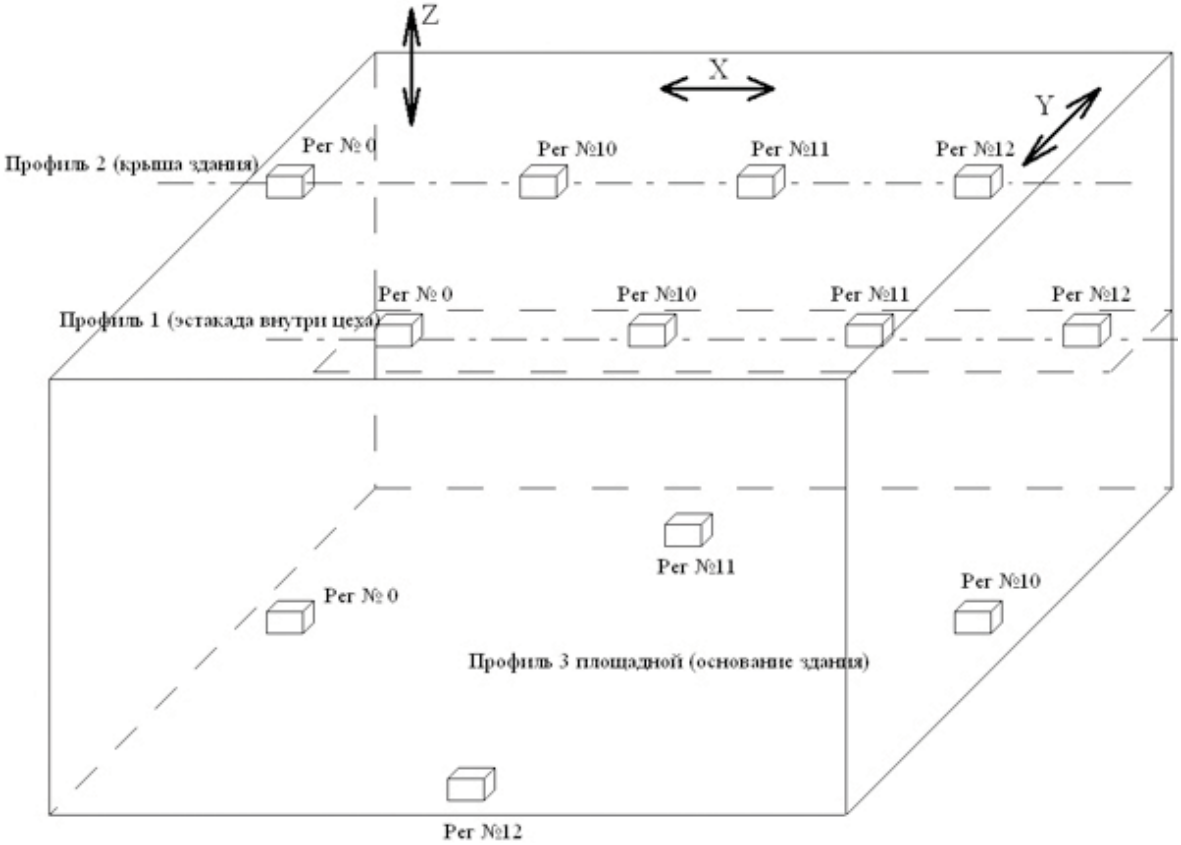

Рисунок 4.2. Расположение приборов на объекте.

Сейсмические станции «Регистр» работали в непрерывном режиме «безусловной записи». На выходе сейсмических станций регистрировался сигнал, пропорциональный скорости смещения в рабочем диапазоне частот. Период дискретизации сейсмических сигналов – 8 мс, что ограничивало верхнюю рабочую частоту регистрации значением 32 Гц. Количество каналов при регистрации – 3. Установленный коэффициент усиления – 64.

Ориентация сейсмоприемников была фиксированной: горизонтальная компонента X ориентировалась вдоль длинной стены объектов обследования, горизонтальная компонента Y – вдоль короткой стены и вертикальная компонента Z - вверх.

Неотъемлемой частью данного комплекса является программное обеспечение для визуализации и расчета сейсмодинамических характеристик.

На рисунке 4.3 приведен фрагмент сейсмограммы, записанной одним из регистраторов. И расчет спектра на рисунке 4.4.

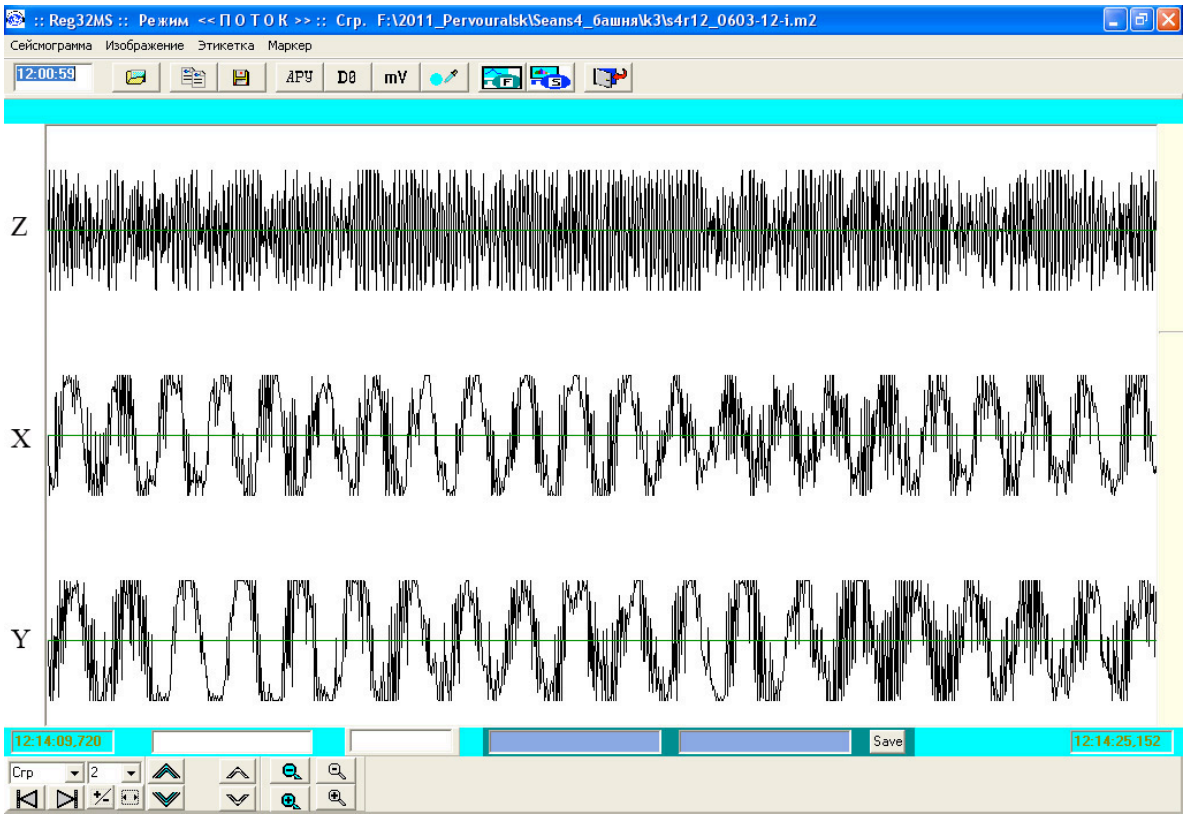

Рисунок 4.3. Фрагмент сейсмограммы. Профиль №4.

Верхняя точка. Регистратор №12

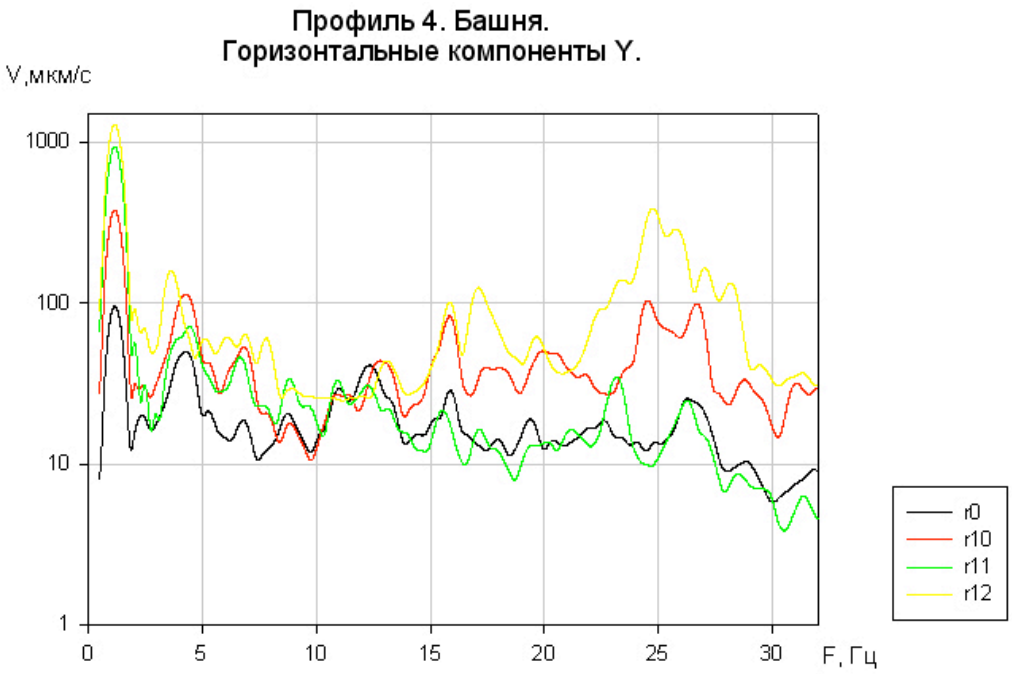

Рисунок 4.4. Пример спектра. Профиль №4.

После расчета спектров выделяем частоты собственных колебаний для каждого регистратора и канала на 4-м профиле (Таблица 4.1) и рассчитываем декремент затухания (Таблица 4.2).

Таблица 4.1. Выделенные частоты собственных колебаний

Профиль, объект	Компонента	f_0, Гц, по точкам				$f_{0\ ср.}$, Гц
		Рег.№0	Рег.№10	Рег.№11	Рег.№12	
Пр.4, башня	Z	15.9	15.4	15.9	17.1	16.08
	X	15.9	15.9	15.8	15.9	15.875
	Y	15.9	15.8	15.5	15.9	15.775
Пр.4, башня	Z	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	X	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	Y	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

Таблица 4.2. Логарифмический декремент затухания

Профиль, объект	Компонента	d по точкам				$d_{ср.}$
		Рег.№0	Рег.№10	Рег.№11	Рег.№12	
Пр.4, башня	Z	0.120	0.255	0.148	0.136	0.165
	X	0.113	0.115	0.191	0.129	0.137
	Y	0.14	0.138	0.178	0.127	0.146
Пр.4, башня	Z	1.434	1.520	1.431	1.546	1.483
	X	1.350	1.336	1.324	1.336	1.336
	Y	1.444	1.429	1.431	1.423	1.432

Полученные результаты (выборочно приведенные в тексте) говорят о том, что максимальный ущерб строительному объекту «Башня разделения воздуха» будет нанесен при внешнем возбуждении на частоте вблизи 16 Гц. Этот вывод может быть использован строителями, проектировщиками при планировании и проведении работ.

Общий вывод по проделанной работе можно сформулировать следующим образом:

- общий корпус колеблется вне зависимости от «башни», а значит, соединение конструкций либо отсутствует, либо повреждено;

- измерены и рассчитаны частоты собственных колебаний объектов, на которых будет наблюдаться явление резонанса. Данная информация должна быть принята к сведению при проведении работ на этом строительном объекте;

- результаты измерений могут быть использованы при проведении мониторинга через два года (в соответствии с ГОСТ) для оценки состояния строительного объекта.

Следующий пример использования регистратора сейсмических сигналов «Регистр» - это проведение работ СМР (сейсмическое микрорайонирование) на территории завода «Тольятти-Азот», г. Тольятти 2016 год.

Инструментальная часть сейсмического микрорайонирования методом сейсмических жесткостей – это профильные сейсмические исследования методом преломленных волн с искусственным возбуждением упругих колебаний. Для ре-

гистрации колебаний использовалась инженерная малоканальная станция «Синус». 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 (4.1):

$$\Delta J = \Delta J_с + \Delta J_в + \Delta J_{рез} \qquad (4.1)$$

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.

Согласно нормативным документам (Бугаев Е.Г. и др. НП-031-01, Приложение 3), спектры коэффициентов динамичности β для различных декрементов затухания приведены на рисунке 4.5 (используется обозначение декремента затухания, как δ).

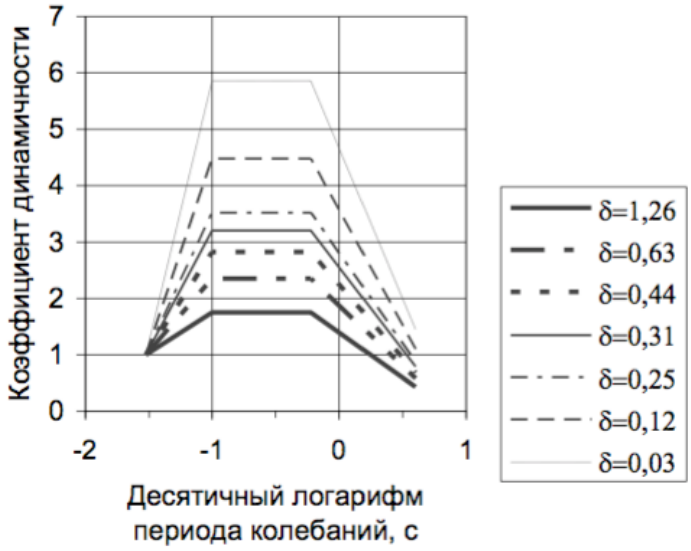

Рисунок 4.5. Спектры коэффициентов динамичности β для различных декрементов затухания.

В соответствии с НП-031-01 численные выражения коэффициента динамичности приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. 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

Проведя измерения и вычислив резонансную частоту и декремент затухания (см. рисунок 4.6 и 4.7), по таблице 4.3, можно выбрать значение коэффициента динамичности. Для вычисления приращения сейсмичности за счет резонансных свойств грунта можно использовать формулу (4.2) (СП 13330.2016. Алешин А.С. и др. 2015):

$$\Delta J_{рез}\ (балл) = 2{,}5\lg\beta - 0{,}75 \qquad (4.2)$$

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

На рисунке 4.6 приведен фрагмент сейсмограммы записи фонового шума и расчет спектра сигнала на рисунке 4.7. По максимуму спектра определяем f_0.

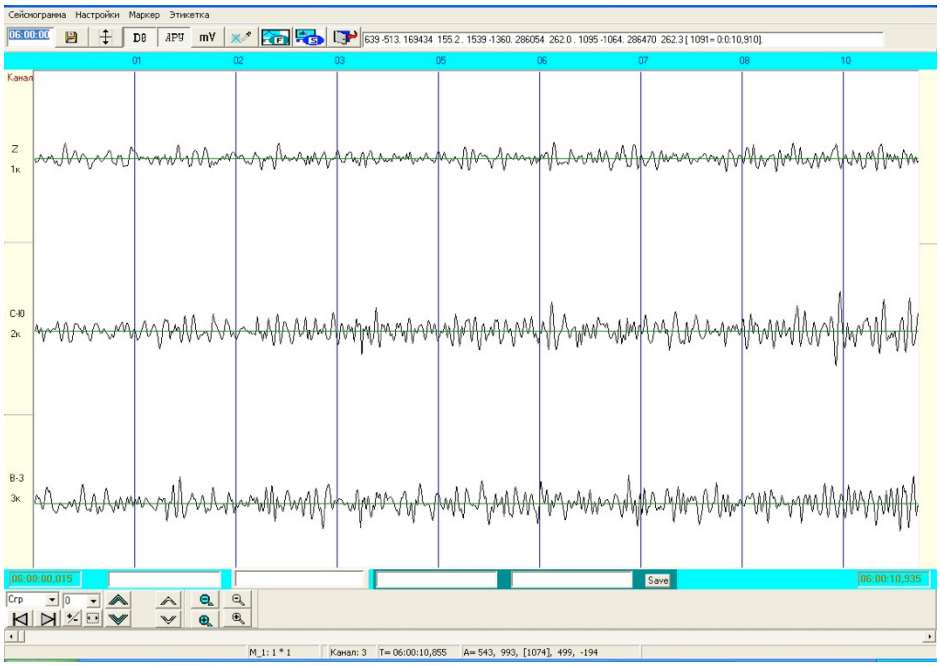

Рисунок 4.6. Фрагмент сейсмограммы записи фонового шума.

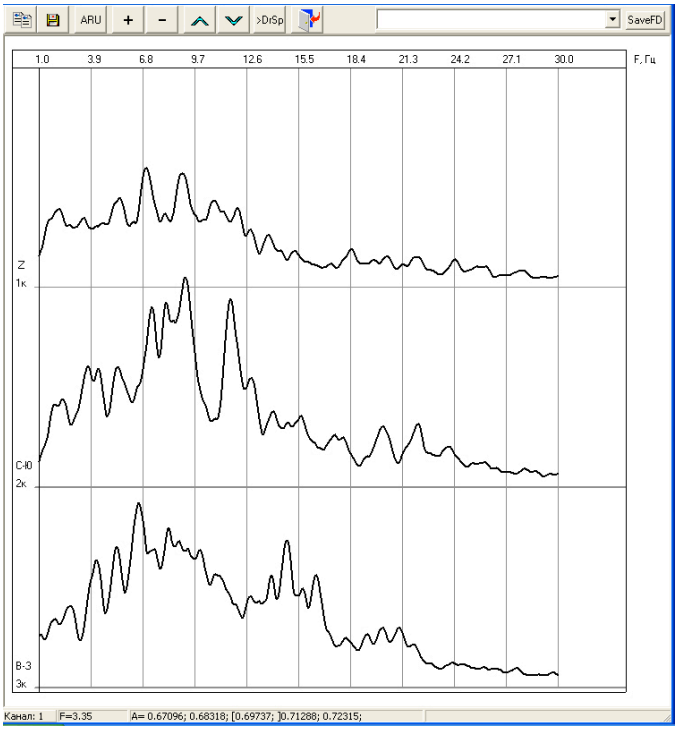

Рисунок 4.7. Частотный спектр фонового шума.

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.

Таким образом, можно сделать общий вывод о применении аппаратно-программного комплекса «Регистр»: данный прибор непосредственно связан 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»).

Для подтверждения достоверности получаемых данных 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 4.8. 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. Обратимся к результатам обследования здания, приведенным ниже.

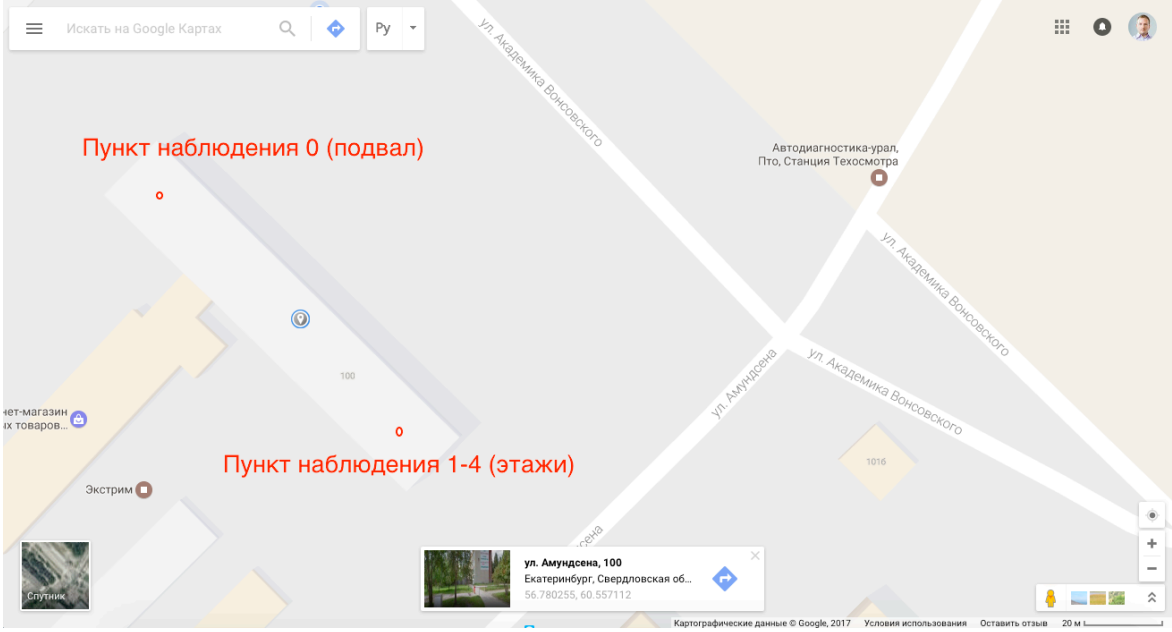

Рисунок 4.8. Расположение пунктов наблюдения и внешний вид здания

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.

В таблице 4.4 приведены расчеты частоты собственных колебаний и декремента затухания, измеренных прибором «Регистр». В таблице 4.5 – прибором «REFTEK».

На рисунке 4.9 и 4.10 показаны фрагменты сейсмограммы, записанные аппаратно-программными комплексами «Регистром» и «REFTEK» в одно и то же время. На рисунке 4.11 и 4.12 посчитаны 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. Анализируя полученные результаты, можем сделать общий вывод о достоверности данных, полученных при помощи регистратора сейсмических сигналов «Регистр».

Таблица 4.4. 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 4.5. 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

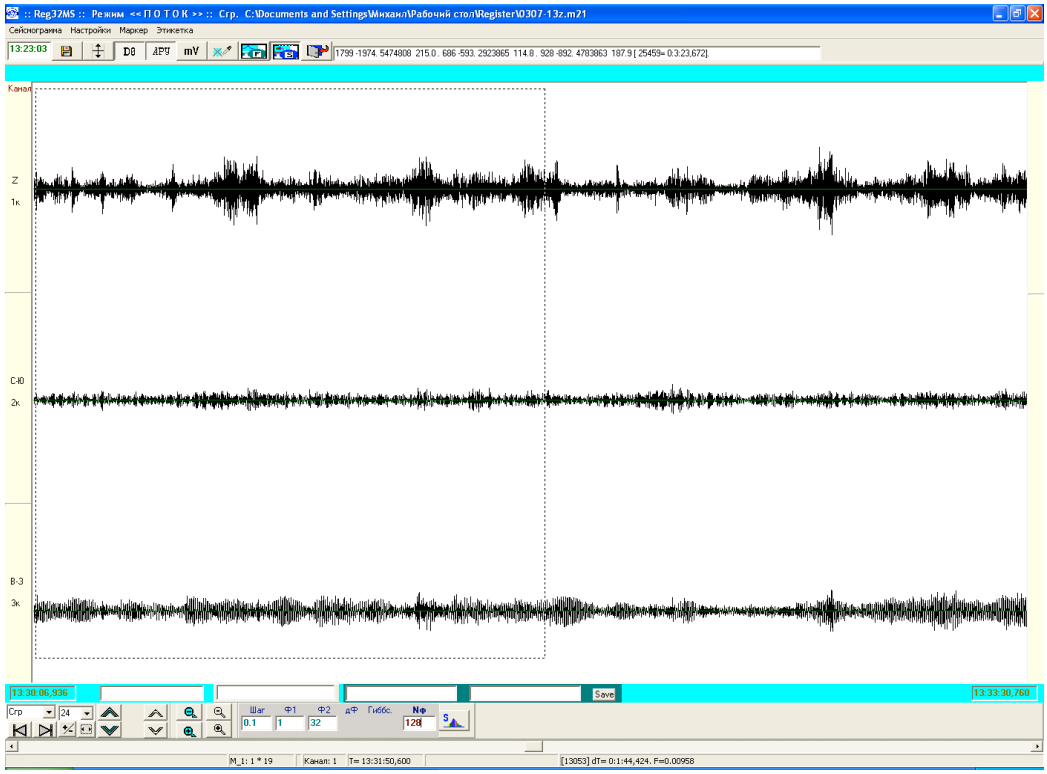

Рисунок 4.9. Фрагмент сейсмограммы, записанной на «Регистр»

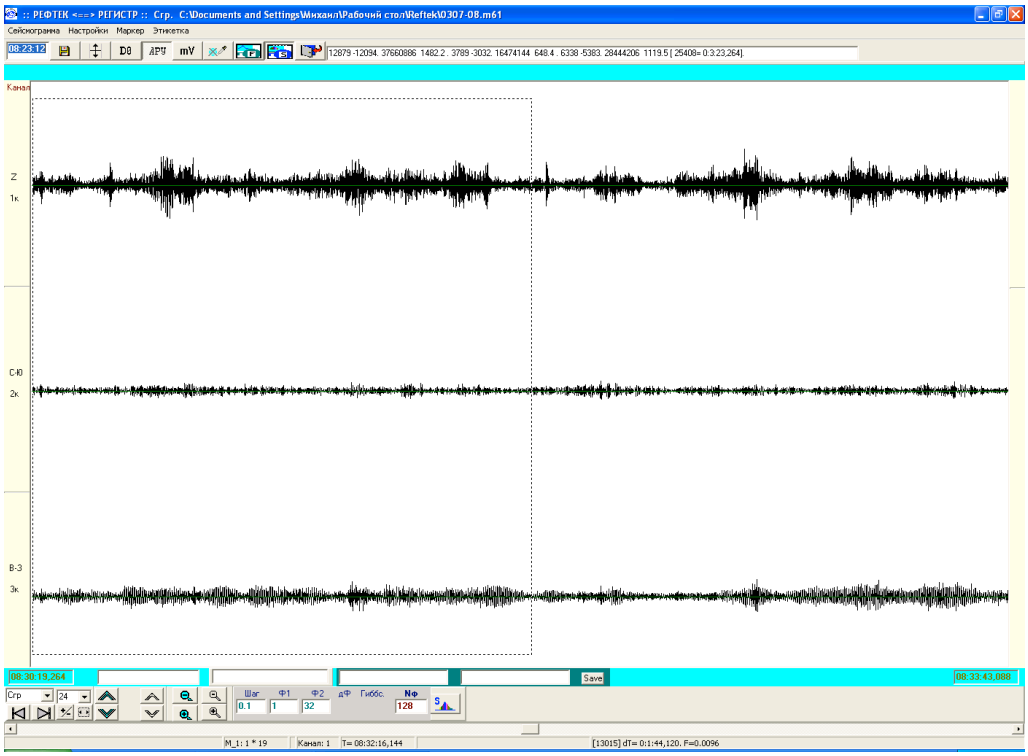

Рисунок 4.10. Фрагмент сейсмограммы, записанной на «REFTEK»

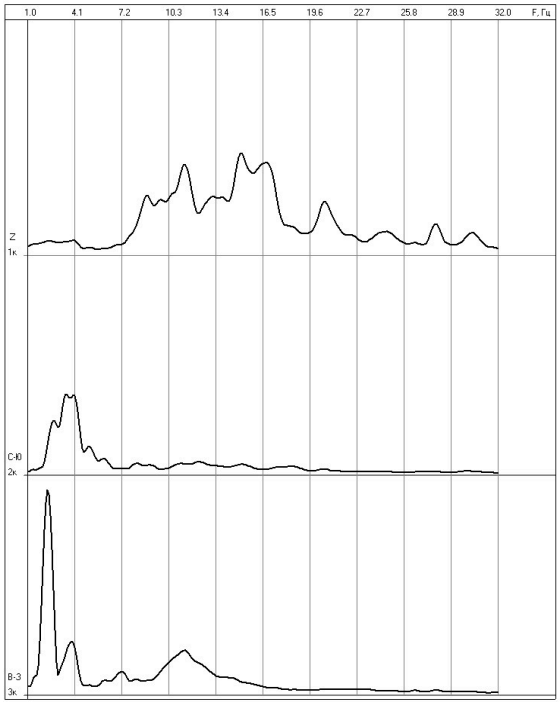

Рисунок 4.11. Рассчитанный спектр фрагмента сейсмограммы («REFTEK»)

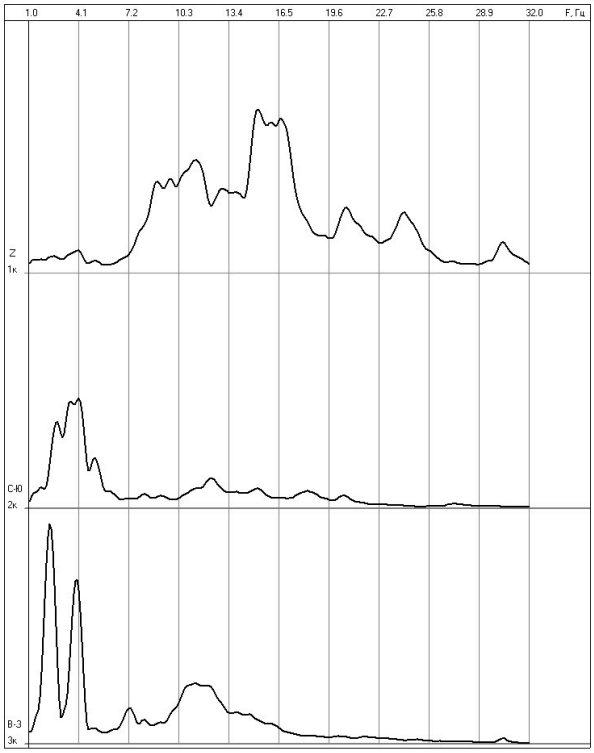

Рисунок 4.12. Рассчитанный спектр фрагмента сейсмограммы («Регистр»)

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.

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

1. Алешин А.С. и др. СП 13330.2016 / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Свод Правил. 2015.
2. Аранович З.И. Аппаратура и методика сейсмических наблюдений в СССР. М.: Наука, 1975. – 243 с.
3. Бурдинский И.Н., Безручко Ф.В., Миронов А.С. Использование GPS-модулей в системах временной синхронизации // Вестник ТОГУ, 2010, №4(19).
4. Бугаев Е.Г. и др. НП-031-01. Нормы проектирования атомных станций / Госатомнадзор РФ. 2001.
5. Булыгин Ф.В. Описание типа средства измерений: регистратор цифровой сейсмический REFTEK DAS-130. ГЦИ СИ ОАО «НИЦПВ». Москва, 2010 г.
6. Волгин Г.А., Рожков А.Ф., Инжутов И.С., Гончаров Ю.М. Численно-экспериментальное исследование динамических параметров крупнопанельного здания. Вестник ТГАСУ №3, 2016. С. 111-120.
7. Голенецкий С.И. Землетрясения в Иркутске. – Иркутск: 1997, 92 с.
8. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва: Стандартинформ, 2011 г.
9. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва: Стандартинформ, 2010 г.
10. ГОСТ Р 54859-2011. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. – Москва: Стандартинформ, 2011 г.
11. Давыдов А.В. Методические указания к лекциям. Цифровая фильтрация информации. Часть 1. Основные понятия. Цифровые фильтры. Министерство высшего и средне специального образования РСФСР. Свердловский горный институт имени В.В. Вахрушева. Свердловск, 1988 г.

12. Давыдов А.В. Методические указания к лекциям. Цифровая фильтрация информации. Часть 2. Весовые функции. Министерство высшего и средне специального образования РСФСР. Свердловский горный институт имени В.В. Вахрушева. Свердловск, 1988 г.
13. Давыдов А.В. Методические указания к лекциям. Цифровая фильтрация информации. Часть 3. Расчет нерекурсивных цифровых фильтров. Министерство высшего и средне специального образования РСФСР. Свердловский горный институт имени В.В. Вахрушева. Свердловск, 1988 г.
14. Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А. и др. Физическая мезомеханика 11/ (2008) с. 26-36.
15. Еремин К.И., Махутов Н.А., Павлова Г.А., Шишкина Н.А. Реестр аварий зданий и сооружений 2001-2010 годов. М., 2011. 320 с.
16. Золотухин Е.П., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Короленко Д.Б., Нескородев В.Д. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам / Вычислительные технологии / Том 18, Специальный выпуск, 2013. С. 29-36.
17. Капустян Н.К., Дыховичная Н.А. Сейсмический мониторинг ветровых колебаний высотных зданий // Мониторинг небезопасных геологических процессов и экологического состояния среды; УрО РАН. – Екатеринбург-Пермь, 2005. – 225 с.
18. Капустян Н.К., Климов А.Н. и Антоновская Г.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // Высотное строительство. 2013. №11. С. 6-12.
19. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика №2, 2014г., с.154.
20. Кривченко Игорь. AVR-микроконтроллеры: очередной этап на пути развития. Компоненты и технологии. №3. 2002 г.

21. Кривченко Игорь, Ламберт Елена. AVR-микроконтроллеры: семь ярких лет становления. Что дальше? Компоненты и технологии. №1. 2004 г.
22. Ламберт Елена. 8-разрядные микроконтроллеры AVR корпорации Atmel: новинки и тенденции развития. Компоненты и технологии. №6, 2009 г.
23. Медведев С.В. Сейсмическое микрорайонирование. Наука. Москва. 1977 г.
24. Мешков Владимир. Архитектура файловой системы FAT // Системный администратор. № 2(15), 2004 г.
25. Нечаев Е.Е., Рубцов В.Д. Аппаратные и программные средства моделирования спутниковых навигационных сигналов. Научный вестник МГТУ ГА. №158, 2010 г.
26. Патент РФ 2141635. Российская Федерация. Способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществления. / Есенина Н.А., Ларионов В.И., Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М.; заявитель и патентообладатель ТОО «Центр исследования экстремальных ситуаций». - №99105726/28; заявл. 30.03.99; опубл. 20.11.99.
27. Патрикеев А.В., Салатов Е.К. Основы методики динамического мониторинга деформационных характеристик зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2013. №1. С 133-138.
28. Руководство по эксплуатации «Дельта-03». Москва, 2007 г. ООО “Логические Системы”.
29. Руководство по эксплуатации комплекса «Стрела-П». Центр исследования экстремальных ситуаций. Москва, 2016 г. ТУ 4254-001-251001-2009.
30. Сабуров В.С., Кузьменко А.П. Обследование зданий повышенной этажности. Инж.-сейсмометр.метод. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 175 с.
31. Савин С.Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала «Пушкинский» в г. Москва. Инженерно-строительный журнал, №7, 2012.
32. Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010. Инженерно-строительный журнал, №7, 2011.

33. Савин С.Н., Ситников И.В., Титова Л.И., Чернов В.И. Инструментальное определение динамических характеристик зданий и первичная обработка информации // Научно-технический сборник Минобороны. №82.1992. С.7-9.
34. Савин С.Н. и др. Современные методы технической диагностики строительных конструкций зданий и сооружений. СПб.: РДК-принт. 2000. 127 с.
35. Савин С.Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний / МО РФ. М., 2006. 141 с.
36. Сендеров Б.В. Аварии жилых зданий. М.: Стройиздат, 1992. 216 с.
37. Сендеров Б.В., Барков Ю.В., Захаров В.А. Анализ повреждений крупнопанельных зданий: сб.науч.тр. М., 1986. 230 с.
38. Сендеров Б.В., Дронов Ю.П. Натурные исследования прочности крупнопанельных зданий. Бухарест: ИНЧЕРК, 1986.
39. Сенин Л.Н. Паспорт технический «Регистр-3MS». ИГФ УРО РАН. Екатеринбург, 2016 г.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Сенин Л. Н., Воскресенский М. Н., Сенина Т. Е. Аппаратно-программный модуль обмена данными с компьютером микроконтроллерного регистрато-

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

44. 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.
45. 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.
46. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е. Полевые сейсморегистрирующие приборы. LAP Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3-659-42370-3. Торговая марка AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, 2013. 71 с.
47. Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016618341 от 27 июля 2016 года: «Программа обработки сейсмической информации Reg3MSD».
48. Сычев О.В., Нечаев Р.Ю., Ширкин Р.В. Исследование динамических характеристик зданий и сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности на опасном производственном объекте. / Международный научный журнал «Инновационная наука», №10/2015, ISSN 2410-6070. С.116-118.
49. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений, введенный в действие Федеральным законом Российской Федерации от 30.12.2009 №384-ФЗ.
50. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Сейсмоприемник низкочастотный трехкомпонентный СК-1П. Министерство геологии СССР. Научно-производственное объединение Геофизика. Завод КазГеофизПрибор. 1977 г.

51. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. - №4. – с.60-68.

52. Уткин В. И., Сенин Л. Н., Сенина Т. Е. Полевая аппаратура и способ сейсмического мониторинга. Патент RU 2265867. Опубл. Бюлл. Открытия, изобретения…, №10, декабрь 2005 г.

53. Федеральный закон Российской Федерации «О техническом регулировании» от 27.12.2002 №184-ФЗ.

54. Хемминг Р.В., Потапов О.А. Цифровые фильтры. Недра. Москва. 1987г.

55. Хрусталев Дмитрий. GPS – взгляд изнутри. Компоненты и технологии. №6. 2001 г.

56. Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А. Инженерные изыскания и обследование зданий. Специальное строительство. / Вестник МГСУ 12/2015.

57. Шишунов А.Ю. Столбов И.А., Пирожкова О.В. Применение GPS-системы в геологии и геофизике // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. №11, 2002 г.

58. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – с.5-94.

59. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий; Ин-т эколог. проблем Севера УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 156 с.

60. Clinton J.F., Bradford C.S., Heaton T.H., Favella J. // Bulletin of Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96(1). – P.237-257.

61. Dalgleish W.A., Rainer J.H. Measurements of wind induced displacements and accelerations of a 57-storey building in Toronto, Canada // Proc. 3rd Colloquium Onindustrial Aerodynamics, Aachen, 14-16 June 1978. – Vol.2. – P. 67-78.

62. Datasheet Atmega 64. Atmel Corporation 2009. www.atmel.com

63. Datasheet Atmega 8515. Atmel Corporation 2003. www.atmel.com

64. Datasheet FT232. Future Technology Devices International Limited, 2008. www.ftdichip.com
65. Datasheet FT245. Future Technology Devices International Limited, 2010. www.ftdichip.com
66. Datasheet SDHC. APRO Co., Ltd. 2012.
67. Datasheet Quectel L10. Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., 2012. www.quectel.com
68. Datasheet. LE-xD Seismometer Family Document Number: 990-0073. 2014.
69. Field E.H., Jacob K.H., Hough S.E. Earthquake site response estimation: A week-motion case study // Bull. Seism. Soc. Am. – 1992. – V.82. – №6. – P.2283-2307.
70. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhaes F., Cunha A. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. – 2014. – Vol.59 – P.80-94.
71. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review // Engineering Structures. – 1997. – Vol. 19 (9). – P.718-723.
72. Yuen K.V., Kuok S.C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32. – P.2379-2386.