

УДК 004.3:502.057

**ПОЛЕВОЙ РЕГИСТРАТОР
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ РЭМАС-1 ДЛЯ МОНИТОРИНГА
РАЗВИТИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

А.А. Бомбизов, А.В. Филатов, А.Г. Лощилов,
А.А. Беспалько*

Томский университет систем управления
и радиоэлектроники

*Томский политехнический университет
E-mail: besko48@tpu.ru

Для мониторинга развития процессов разрушения образцов и массивов горных пород по параметрам электромагнитных сигналов разработан регистратор, обеспечивающий прием и обработку этих сигналов по алгоритму быстрого оконного преобразования Фурье, а также вывод результатов преобразования в запоминающее устройство или удаленному оператору. В приборе реализован канал приема и записи акустических импульсов. Регистратор способен работать в автономном режиме и в информационной сети. Приведена и описана его структурная схема.

Ключевые слова:

Электромагнитные и акустические сигналы, геодинамические явления, амплитудно-частотный регистратор, структурная схема.

В настоящее время при проведении геофизических исследований особый интерес представляют измерения электромагнитных сигналов (ЭМС), возникающих в ходе изменения напряженно-деформированного состояния горных пород. Изучая пространственную структуру электромагнитного поля, комплексную амплитуду его спектральных составляющих, можно оценить этапы подготовки геодинамических явлений в горном массиве [1], что в будущем позволит получить дополнительный индикатор краткосрочного прогноза землетрясений [2, 3]. По данным авторов работы [4] наибольшей информативностью обладает диапазон частот от 1 до 100 кГц, в котором необходимо обеспечить динамический диапазон измерения сигналов не менее 60 дБ при чувствительности входного тракта не хуже 10 мкВ. Проблема мониторинга ЭМС в области низких и средних частот заключается в необходимости обеспечения длительной записи в цифровом формате спектрограмм сигналов с высоким разрешением по частоте и в реальном масштабе времени. Это требует больших объ-

Бомбизов Александр Александрович, аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского университета систем управления, мл. науч. сотр. специализированного конструкторского бюро «Смена».

E-mail: unclelab@gmail.com
Область научных интересов: радиометрия, приборостроение.

Филатов Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского университета систем управления.

E-mail: unclelab@gmail.com
Область научных интересов: радиометрия.

Лощилов Антон Геннадьевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. специализированного конструкторского бюро «Смена».

E-mail: yogl@mail.ru
Область научных интересов: исследование свойств объектов в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия, приборостроение.

Беспалько Анатолий Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников ТПУ.

E-mail: besko48@tpu.ru
Область научных интересов: геодинамика; электрические и магнитные свойства горных пород; механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах и горных породах; методы и приборы контроля природной среды.

ёмов памяти и энергетических ресурсов, что ограничивает возможности переносного прибора для натуральных измерений, в частности, при использовании его в подземных горнодобывающих сооружениях.

Разрабатываемый амплитудно-частотный регистратор представляет собой измерительный комплекс, обеспечивающий прием электромагнитных и акустических сигналов (АС), их предварительную обработку и передачу во флэш-память или через порт RS-485 удаленному диспетчеру для размещения в базе данных, последующего анализа и принятия решения об опасности контролируемых геодинамических процессов. Входной тракт для электромагнитных сигналов в комплексе организован по дифференциальной схеме. Особенности этого комплекса также должны быть малые массогабаритные характеристики, защищенность от повышенной влажности и запыленности, низкое энергопотребление, обеспечивающие мобильность, продолжительность и безопасность работы в подземных выработках.

На рис. 1 представлена структурная схема амплитудно-частотного регистратора, в котором для сокращения объёмов выходных данных реализована первичная обработка оцифрованных входных аналоговых сигналов от датчиков с последующей записью во флэш-память. Основу математической обработки составляет быстрое оконное преобразование Фурье (БОПФ), результатом которого являются спектрограммы амплитуд, полученные в реальном масштабе времени. В состав комплекса, в той же области частот ($1 \div 100$) кГц, включен модуль измерения и анализа акустических сигналов для возможности проведения корреляционного анализа параметров электромагнитных и акустических колебания, а также для фиксирования самого факта свершения геодинамического события.

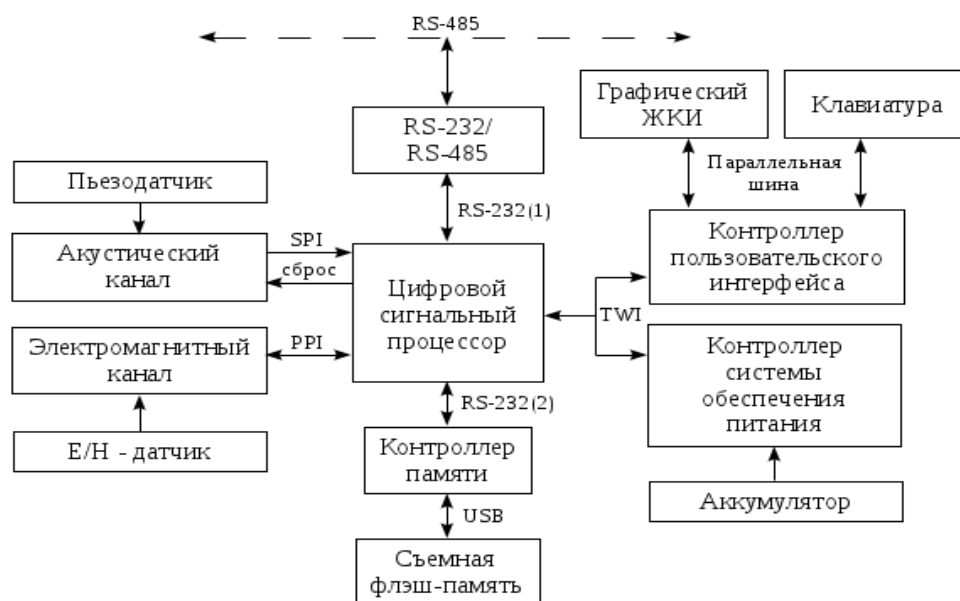


Рис. 1. Структурная схема регистратора

В основу построения регистратора положен модульный принцип. Основным элементом прибора является цифровой сигнальный процессор (ЦСП), управляющий всеми периферийными модулями и выполняющий математические расчёты. Для логического разделения задач работа с пользовательским интерфейсом и системой обеспечения питания возложена на отдельные контроллеры.

В ходе первичной обработки, при вводе и выводе информации, используется клавиатура и графический жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). Прибор работает от аккумулятора с энергоёмкостью 300 Вт/ч, что позволяет обеспечить автономность функционирования комплекса в течение 3 суток.

Посредством интерфейса RS-485 обеспечивается возможность соединения нескольких приборов комплекса в распределенную сеть для анализа и установления корреляционных связей при пространственной обработке электромагнитных и акустических сигналов. Модуль аналоговой обработки и оцифровки сигналов состоит из электромагнитного и акустического каналов. Структура электромагнитного канала изображена на рис. 2, а. С помощью датчиков измеряются электрическая или магнитная составляющие напряженности электромагнитного низкочастотного поля (ЭМП) в диапазоне $(1 \div 100)$ кГц.

Для регистрации электрической составляющей напряженности электромагнитного поля используется ёмкостной датчик, выполненный в виде двух параллельных друг другу металлических пластин площадью $0,015 \text{ м}^2$, расположенных на расстоянии 15 мм. Ёмкость датчика составляет около 20 пФ. Магнитная составляющая напряженности ЭМП регистрируется с помощью индукционного датчика, который представляет собой катушку индуктивности на стержневом ферромагнитном сердечнике [5].

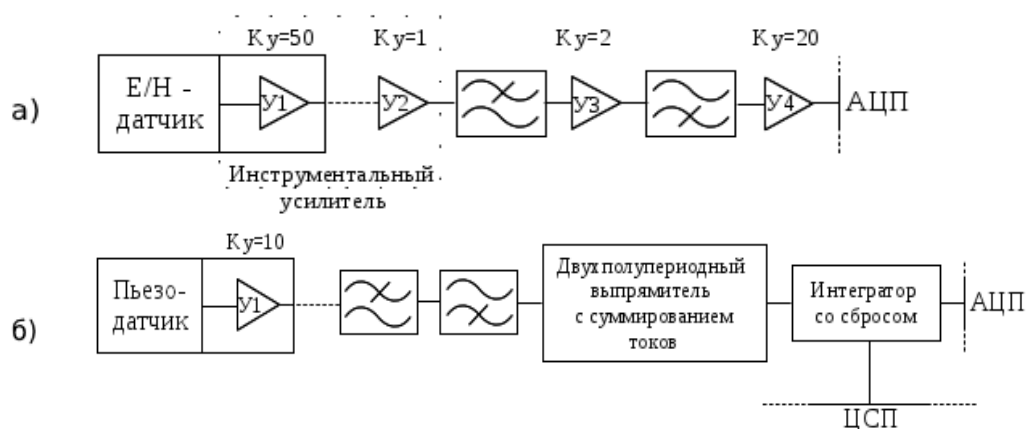


Рис. 2. Структурная схема аналоговых модулей: а) электромагнитный канал; б) акустический канал

Конструктивно индукционный датчик исполнен таким образом, чтобы входить в отверстие диаметром 42 мм, что соответствует одному из размеров пробуренных шпуров в бортах проходок рудника или шахты. Сигналы датчиков поступают на выполненный по инструментальной схеме усилитель, который содержит два каскада $У_1$ и $У_2$ на операционных усилителях AD8626. Для минимальных искажений входного сигнала каскад усилителя $У_1$ размещён внутри корпуса датчиков. По витой паре усиленный в $У_1$ дифференциальный сигнал передается на вход второго каскада $У_2$, в котором происходит ослабление наведенной при передаче помехи на 40 дБ в измеряемой полосе частот. С выхода $У_2$ сигнал поступает на фильтр Баттерворта верхних частот шестого порядка с частотой среза 1 кГц. В ходе данной фильтрации минимизируется влияние помех промышленной частоты и ее гармоник. После дополнительного усиления в $У_3$ сигнал поступает на фильтр Баттерворта низких частот шестого порядка с частотой среза 100 кГц. Ослабление на частоте 500 кГц составляет 60 дБ, на 900 кГц – 115 дБ. Перед поступлением сигнала на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) происходит его нормирование в усилителе $У_4$. В качестве АЦП используется микросхема AD7951 с частотой дискретизации 1 МГц, что исключает попадание зеркальной полосы в оцифрованный сигнал. Разрядность АЦП составляет 14 бит. Это обеспечивает преобразования в заданном динамическом диапазоне измерения сигнала. С выхода АЦП передача данных в цифровой сигнальный процессор производится по параллельному порту, логика работы которого соответствует интерфейсу PPI.

На рис. 2, б изображена структурная схема акустического канала. Пьезоэлектрический датчик конструктивно исполнен по рекомендациям, приведенным в работе [6]. Такая конструкция обеспечивает значительное уменьшение резонансных характеристик пьезоэлектрической керамики. Для контакта с породным массивом в датчике предусмотрен конусный наконечник

из закаленной стали. Частотные фильтры акустического канала аналогичны фильтрам в электромагнитном канале. Но принцип действия акустического канала отличается от работы электромагнитного тем, что в нем происходит накопление энергии во всей полосе анализируемых частот. Для этого используется интегратор с постоянной времени 6,3 мс. В конце цикла накопления, через 10 мс, выходное напряжение интегратора преобразуется в цифровую форму АЦП AD7853. Затем ЦСП выполняет разряд накопительного конденсатора интегратора. Связь АЦП с цифровым процессором осуществляется по протоколу SPI.

В регистраторе цифровой сигнальный процессор выполнен на микросхеме ADSP-BF537 с тактовой частотой ядра 500 МГц. В состав ЦСП входит оперативное запоминающее устройство на двух микросхемах MT48LC32M8A2 емкостью по 32 МБ каждая. Для загрузки программного обеспечения (ПО) установлено постоянное запоминающее устройство M29W320DT емкостью 4 МБ. Выбор ЦСП осуществлялся на основании критериев производительности и потребляемой мощности. Для оценки производительности проводился тест, в котором выполнялось быстрое оконное преобразование Фурье над оцифрованными сигналами. Выбирались 1024 отсчёта с разрядностью 16 бит. В результате обработка данных была произведена за время 0,3 мс.

Для оперативного управления комплексом и его настройки после включения ввод необходимых установок регистрации происходит с применением графического ЖКИ FDCG240128B-1 и плёночной клавиатуры, выполненной в виде матрицы кнопок 3×4. Данные устройства ввода-вывода управляются микроконтроллером (МК) пользовательского интерфейса AT91SAM7S256. Напряжение питания прибора составляет 16...24 В. В модуле питания размещены 3 стабилизатора фирмы АИМТЕС с выходными напряжениями 3,3 и 5 В для обеспечения питания цифровой части прибора и ± 15 В для работы аналоговой части. Контроль питания осуществляется под управлением микроконтроллера Atmega8L. Оба используемых контроллера взаимодействуют с ЦСП по интерфейсу TWI. На микроконтроллер пользовательского интерфейса возложена роль маршрутизатора. МК запрашивает пакет данных от ЦСП или модуля питания и в зависимости от указанного адреса пересылает данные или обрабатывает сам. Для этого от ЦСП к контроллеру введена линия связи, по которой процессор подает сигнал для вывода МК из ждущего режима и начала взаимодействия по интерфейсу TWI.

В приборе предусмотрено автоматическое отключение питания, когда напряжение аккумуляторной батареи снизится до 16 В. В этом случае контроллер питания подает сигнал в ЦСП для завершения работы и сохранения данных, после чего с помощью ключа на микросхеме IPS511S выключает прибор. Контроллер питания использует дополнительный стабилизатор напряжения для обеспечения работы в «спящем» режиме. По нажатию кнопки «Вкл. Пит» микроконтроллер включает ключ, тем самым запуская в работу всю систему.

Роль сохранения информации на съёмный флэш-носитель отведена контроллеру памяти VNC1L фирмы FTDI. Основным его преимуществом является реализация на кристалле файловой системы FAT32. Это позволяет осуществлять высокоуровневое взаимодействие, например, создание файла, чтение и запись в него информации и т. д. Побайтовая передача данных в контроллер памяти, выполняемая вычислительным ядром ЦСП, требует столько времени работы процессора, что скорость проводимых вычислений над оцифрованным сигналом снижается и становится неудовлетворительной в режиме реального времени. Поэтому программные модули для сохранения результатов используют контроллер прямого доступа к памяти. В выбранном процессоре отсутствует поддержка аппаратного управления потоком RTS/CTS контроллером прямого доступа. В связи с этим реализован следующий алгоритм. ЦСП отслеживает состояние вывода RTS порта VNC1L. Если входной буфер данных контроллера памяти заполнен, процессор приостанавливает контроллер прямого доступа к памяти, пока состояние флага RTS не будет сброшено.

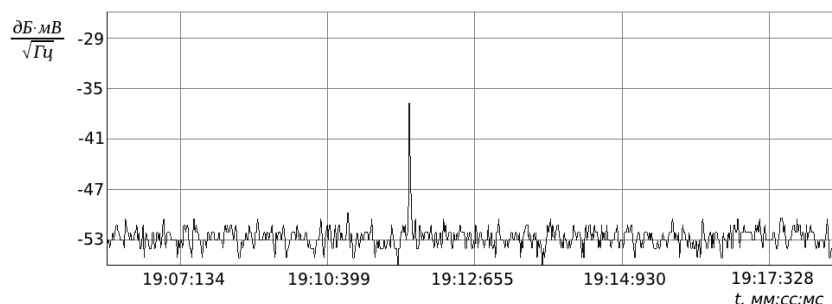


Рис. 3. Электромагнитный сигнал на частоте 13 кГц, предшествующий разрушению образца горной породы на прессе

Тестирование прибора проводилось на экспериментальной установке, которая представляла собой гидравлический пресс с установленным образцом – керном в форме цилиндра высотой 8 см и диаметром 4 см. На программируемом прессе проводилось одноосное сжатие образцов до разрушения. Во время тестирования зарегистрированы и сохранены на флэш-носителе электромагнитные импульсы, которые возникли при образовании трещин в образце. Зависимость спектральной составляющей от времени на частоте 13 кГц одного из таких сигналов изображена на рис. 3.

Основные технические характеристики прибора: диапазон частот анализа сигналов от 1 до 100 кГц; чувствительность электромагнитного канала – 2 мкВ, акустического – 5 мВ; динамический диапазон – 60 дБ; тип фильтрации – б.п.ф.; период обновления спектральных характеристик – 16 мс; шаг по частоте – 1 кГц; полосы фильтров по уровню 3 дБ составляют 3 кГц; коэффициент прямоугольности фильтров по уровням -3 дБ и -30 дБ составляет 0,3; емкость аккумуляторных батарей – 16 А/ч.; время автономной работы прибора не менее 3 суток; масса прибора в комплекте с аккумуляторной батареей не более 8 кг.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК № 16.515.11.5085 и гранта РФФИ № 11-07-00666-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Климко Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 2. – С. 285–287.
2. Рожной А.А., Соловьева М.С., Молчанов О.А., Чебров В.Н., Воропаев В.Ф. ОНЧ/НЧ мониторинг ионосферных возмущений сейсмического происхождения в Курило-Камчатском регионе // Сборник докладов Международной конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 225–230.
3. Беспалько А.А., Яворович Л.В. Вариации электромагнитной эмиссии при изменении напряженно-деформированного состояния массива горных пород после массового взрыва // Сборник докладов Международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. – 456 с.
4. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Виитман Е.В. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения // Геодинамика. – 2008. – № 1 (7). – С. 54–60.
5. Максименко В.Г. Чувствительность низкочастотного магнитоиндукционного датчика // Радиотехника. – 2009. – № 8. – С. 44–47.
6. Королев М.В. Аперриодический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 12–18.

Поступила 11.01.2012 г.