

УДК 004.3: 502.057

А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лоцилов, А.В. Филатов

Разработка прибора для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород по косвенным признакам электромагнитного и акустического излучения

Статья посвящена созданию прибора средств для продолжительного мониторинга развития процессов разрушения образцов и массивов горных пород по признакам электромагнитного и акустического излучения. Описываются созданные аппаратные средства для регистрации и обработки в полевых условиях сигналов низкой и средней частоты в режиме реального времени и сохранения данных на съемный носитель информации.

Ключевые слова: электромагнитные сигналы, акустические сигналы, продолжительный мониторинг, амплитудно-частотный регистратор, спектральный анализ.

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

В данной работе описывается амплитудно-частотный регистратор, с помощью которого решается задача увеличения продолжительности записи результатов мониторинга горных пород в шахтных сооружениях. Регистратор обеспечивает 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 мониторируемых 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 объемов 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 (1–100) кГц включен модуль измерения и анализа акустических сигналов для возможности проведения корреляционного анализа параметров электромагнитных и акустических колебаний, а также для фиксирования самого факта свершения геодинамического события.

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.

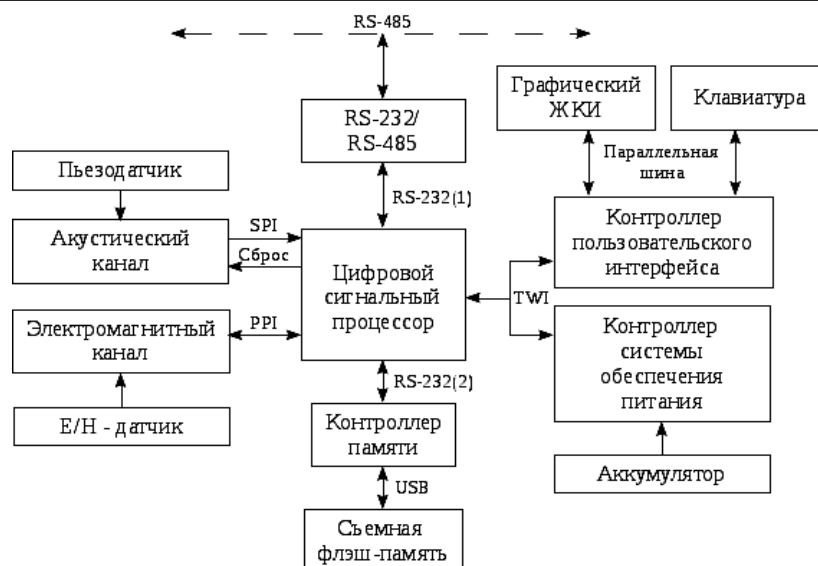


Рис. 1. Структурная схема регистратора

В ходе первичной обработки при вводе и выводе информации используется клавиатура и графический жидкокристаллический дисплей. 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÷100 кГц.

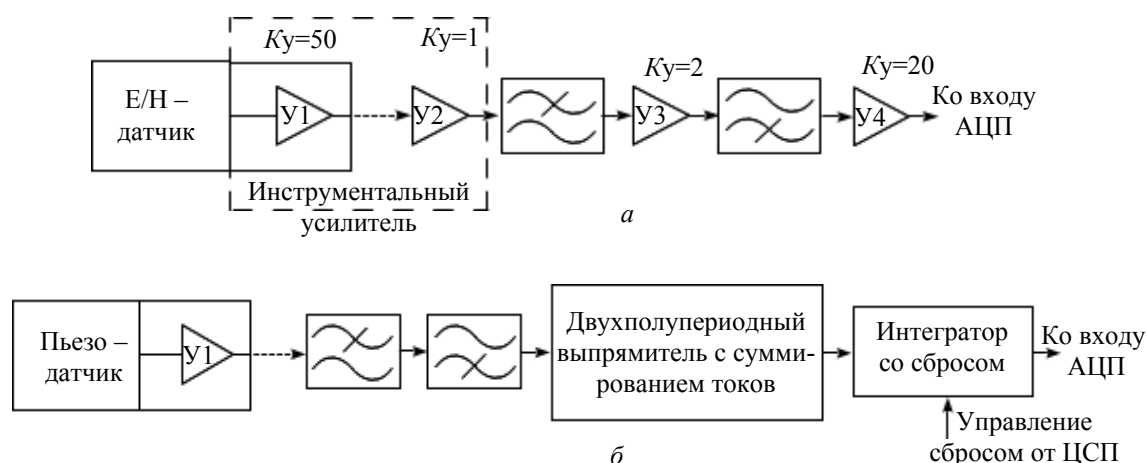


Рис. 2. Структурная схема аналоговых модулей: а – электромагнитный канал; б – акустический канал

Для регистрации электрической составляющей напряженности электромагнитного поля используется ёмкостной датчик, выполненный в виде двух параллельных друг другу металлических пластин площадью 150 см², расположенных на расстоянии 1,5 см. 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]. 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 У1 и У2 на операционных усилителях AD8626. Для ми-

нимальных искажений входного сигнала каскад усилителя У1 размещён внутри корпуса датчиков. По витой паре усиленный в У1 дифференциальный сигнал передается на вход второго каскада У2, в котором происходит ослабление наведенной при передаче помехи на 40 дБ в измеряемой полосе частот. С выхода У2 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 У3 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 У4. 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 жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) FDCG240128B-1 и плёночной клавиатуры, выполненной в виде матрицы 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 АІМТЕС 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 нажатии 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.

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-носитель 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.

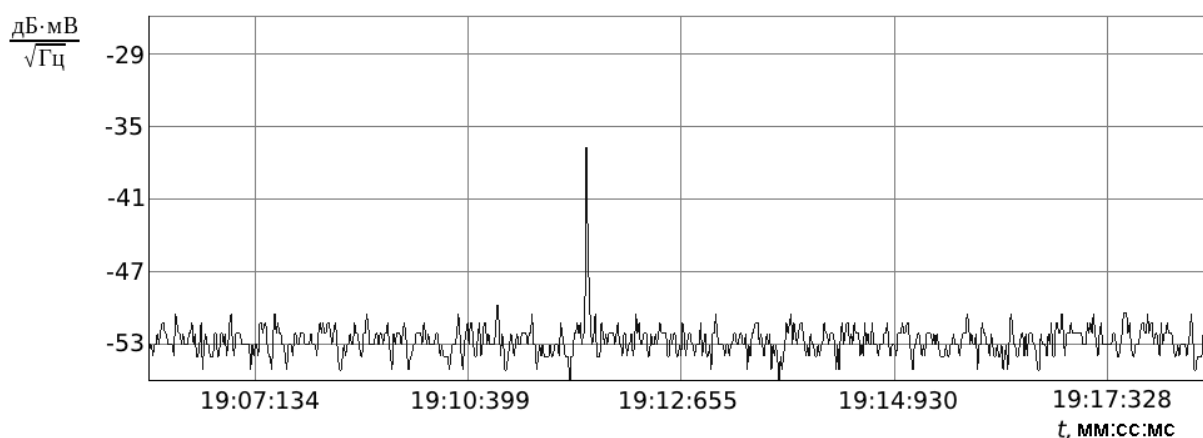


Рис. 3. Электромагнитный сигнал на частоте 13 кГц, предшествующий разрушению образца горной породы на прессе

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 – 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 в порядке реализации Постановления Правительства РФ № 218 (контракт 13.G25.31.0017).

Литература

1. Беспалько А.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.А. Климов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, – № 2. – С. 285–287.
2. ОНЧ/НЧ мониторинг ионосферных возмущений сейсмического происхождения в Курило-Камчатском регионе / А.А. Рожной, М.С. Соловьева, О.А. Молчанов и др. // Сб. докл. междунар. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 225–230.
3. Беспалько А.А. Вариации электромагнитной эмиссии при изменении напряженно-деформированного состояния массива горных пород после массового взрыва / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович // Сб. докл. междунар. конф. «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. – 456 с.

4. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов, Е.В. Виитман // 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. Аперiodический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 12–18.

Бомбизов Александр Александрович

Аспирант каф. телекоммуникации и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа, м.н.с. СКБ «Смена»

Тел.: +7-903-951-15-24

Эл. почта: unclalab@gmail.com

Беспалько Анатолий Алексеевич

Канд. физ.-мат. наук., в.н.с. ПНИЛ ЭДиП ИНК ТПУ

Тел.: 8-(382-2) 41-75-28

Эл. почта: besko48@tpu.ru

Лошилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук. с.н.с. СКБ «Смена»

Тел.: +7-906-947-69-20

Эл. почта: yogl@mail.ru

Филатов Александр Владимирович

Д-р техн. наук., профессор каф. телекоммуникации и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа

Тел.: +7-952-899-96-41

Эл. почта: filsash@mail.ru

Bombizov A.A., Bospalko A.A., Loshchilov A.G., Filatov A.V.

Development of the device for strain-stress state of mine rocks by means of electromagnetic and acoustic signals

The article is devoted to the creation of means for continuous monitoring of the destruction processes of samples and rock mass characteristics of electromagnetic and acoustic radiation. This article describes the created hardware for recording and processing of signals in the field of low and medium frequency in real time and save data to removable media.

Keywords: electromagnetic signals, acoustic signals, continuous monitoring, amplitude-frequency recorder, spectral analysis.