

УДК 550.380.83 / 621.317.328 (575.2) (04)

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ ПРИЕМНЫЙ КОМПЛЕКС
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН**

П.В. Ильичёв – зав. лабораторией,
В.В. Бобровский – вед. инж.-конструктор,
Д.С. Мясников – инженер-исследователь,
Г.С. Закупина – инженер-исследователь
Научная станция Российской академии наук

The structure's features and technical characteristics of the up-to-date receiving measuring complex for electromagnetic monitoring of the deflected mode of the Earth's crust are considered in this work. The first results that have been received from the test of the receiving station's model are given and analyzed.

Введение. Научное и практическое значение проблемы мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры в сейсмоактивных районах и в зонах расположения особо важных объектов, горнодобывающих и опасных производств общеизвестно и не вызывает никакого сомнения. Как известно, деформационный процесс, приводящий к катастрофам, зависит от распределения поля напряжений в объеме данной территории. Именно по этой причине на конечном этапе проблема мониторинга сводится к получению достоверных знаний о распределении напряжений в земной коре в широком диапазоне глубин (1–30 км). Изменение напряженного состояния горных пород находит отражение в изменениях их физических свойств, в частности, электрических (удельное сопротивление) и в меньшей степени механических. Электромагнитные методы изучения земной коры на базе мощных источников тока, имеющие достаточную чувствительность и глубинность, позволяют проводить такие работы. Контролируемыми параметрами в мето-

дах активной геоэлектроразведки [1] являются удельное электрическое сопротивление, его латеральная анизотропия и поляризация отдельных объектов в земной коре.

Организация непрерывного электромагнитного мониторинга глубинных слоев земной коры в сейсмоактивных зонах предполагает размещение на большой территории сети высокоточных специальных электромагнитных измерительных станций. Типовая структура системы активного электромагнитного мониторинга состоит из трех частей:

- 1) мощный источник электромагнитного поля, возбуждающий в земной коре электромагнитные волны в широком спектре частот;
- 2) система приемных электромагнитных пунктов, обеспечивающих регистрацию и первичную обработку откликов на зондирующее электромагнитное поле;
- 3) центральный пункт сбора и обработки поступающей от приемных пунктов информации.

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой аппаратных и программных средств приемных электромагнитных станций. Рассматриваются особенности структуры и технические характеристики измерительного комплекса, анализируются первые результаты, полученные при испытании макетного образца приемной станции, приводится сопоставительный анализ макетного образца с прототипом, созданным ранее в ИС РАН [2, 3]. Работы выполняются ИС РАН в г. Бишкеке в рамках государственного контракта с Роснаукой №02.515.11.5014 от 5 апреля 2007 г.

Характеристики и особенности аппаратуры приемного измерительного комплекса системы электромагнитного мониторинга

При определении технических требований, предъявляемых к аппаратуре приемного измерительного комплекса системы электромагнитного мониторинга развития напряженно-деформационных процессов в земной коре, прежде всего, учитывались показатели точности и надежности измерений. Отправной точкой для определения технических характеристик новых измерительных станций послужили параметры используемых в ИС РАН одноканальных измерительных станций КИЦ. Технические характеристики этих станций, к сожалению, уже не отвечают современным требованиям и задачам научных геофизических исследований. Прежде всего, это относится к их чувствительности, динамическому диапазону, точности синхронизации с генераторной установкой и числу измерительных каналов.

Увеличение количества измерительных пунктов системы электромагнитного мониторинга и измерительных каналов на каждом из них, а также расширение частотного диапазона регистрируемых сигналов резко увеличивают поток получаемой с этих пунктов информации в единицу времени. Объемы сохраняемой первичной информации резко возрастают, а алгоритмы ее обработки становятся все сложнее. Для решения таких задач требуется применение современных вычислительных средств, обладающих широкими возможностями. Встраиваемые в системы одноплатные микро-ЭВМ зачастую имеют ограниченные возможности (недостаточное быстродействие и ограниченные объемы оперативной памяти, памя-

ти данных и программ и т. п.). Поэтому при разработке типовой приемной измерительной станции в основу ее структуры было заложено использование внешнего компьютера, при этом учитывались следующие требования:

1. Невмешательство в структуру внешнего компьютера измерительной системы. Максимальное использование стандартных интерфейсов и протоколов обмена ЭВМ. При выполнении этого условия пользователь системы получает возможность своевременного технического перевооружения и резервирования вычислительной техники (ВТ), неся при этом минимальные дополнительные затраты.

2. Должна быть обеспечена работа внешнего компьютера только в операционной системе (ОС), наиболее широко используемой на данном этапе развития вычислительной техники (Win 2000, XP, Linux).

3. Открытость и гибкость системы. Прежде всего, должна быть обеспечена возможность программного и технического развития системы, ее переориентации на решение новых дополнительных задач.

Эти требования предопределили создание новой измерительной аппаратуры для электромагнитного мониторинга, обладающей такими качествами, как многоканальность, широкополосность, большой динамический диапазон, и допускающей гибкую и быструю перестройку аппаратных и программных средств под новые алгоритмы измерения и обработки сигналов.

По всем основным техническим параметрам станция ИС-2 значительно превосходит свой прототип. Она предназначена для многоканальной регистрации и обработки сигналов электрических датчиков (приемных диполей) при проведении исследований земной коры методами электроразведки: зондирование становлением поля в дальней (ЗСД) и в ближней (ЗСБ) зоне [4]. Аппаратура измерительной станции выполнена на современной элементной базе, производимой известными фирмами (Analog Devices, Atmel, Linear Technology, Cirrus Logic и др.).

При разработке приемной станции за основу была принята функционально-блочная структура построения аппаратной части, обусловленная требованием ее универсальности и гибкости (рис. 1).

Основные технические характеристики прототипа (станция КИЦ)
и новой измерительной станции ИС-2

№ п/п	Параметр	Величина для КИЦ	Величина для ИС-2
1	Количество измерительных каналов, шт.	1	4
2	Подавление промышленных помех частотой $50 \pm 0,5$ Гц, не менее, дБ	60	80
3	Среднеквадратичный шум, приведенный к входу измерительного канала, не более, мкВ	12	2
4	Тренд напряжения смещения (за 1800 сек), приведенный к входу измерительного канала, не более, мкВ	Не нормирован	2
5	Период дискретизации сигналов по времени, мс	20	1,25
6	Разрядность используемых АЦП, бит	12	24
7	Нестабильность временных параметров регистрации (в течение года) не хуже чем	10^{-5}	10^{-9}
8	Погрешность синхронизации приемных станций с работой зондирующей установки, мкс	Не нормируется	± 10

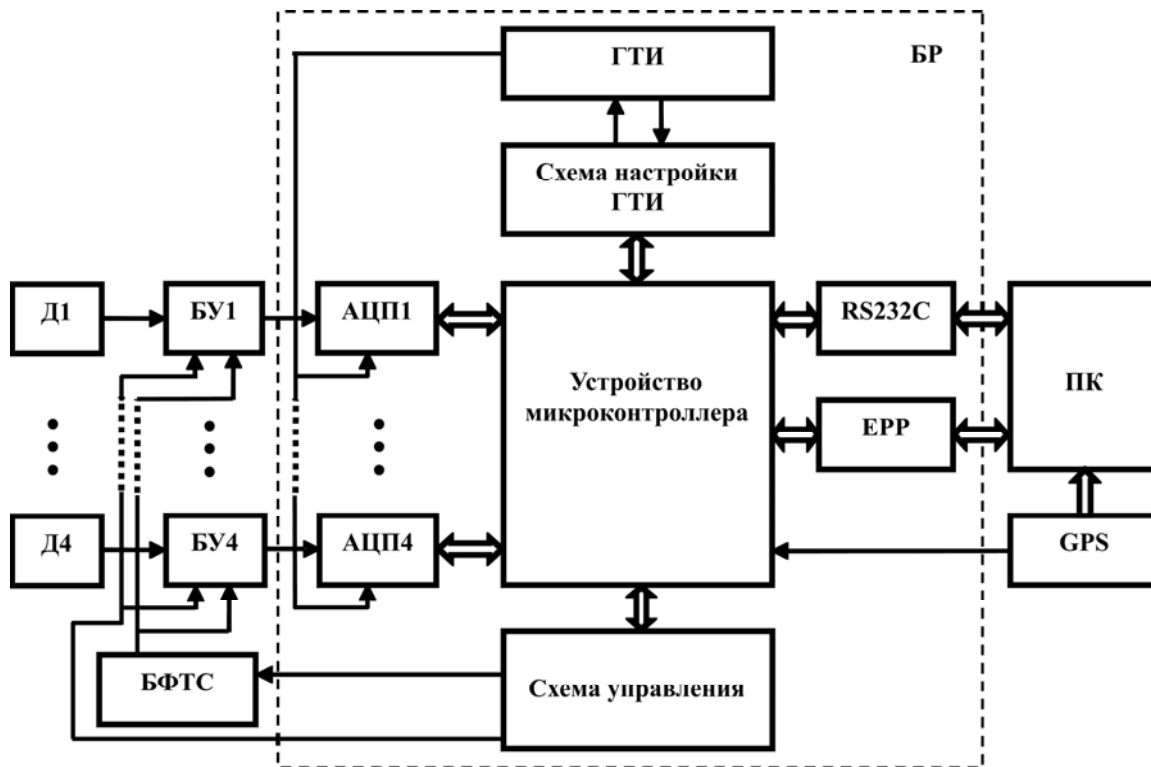


Рис. 1. Структурно-функциональная схема приемной измерительной станции.

Центральным блоком станции является блок регистрации (БР), имеющий в своем составе устройство микроконтроллера. Главными функциями устройства микроконтроллера являются управление режимами работы всех узлов и блоков станции, а также пересылка регистрируемых цифровых данных внешнему компьютеру.

Отличительной особенностью приемного измерительного комплекса является высокая точность измерения сигналов, определяемая точной синхронизацией и высокой стабильностью временных параметров регистрации (период дискретизации сигналов, длительность регистрации).

Точность синхронизации и стабильность временных параметров регистрации определяются параметрами формируемых генератором тактовых синхроимпульсов (ГТИ). В качестве ГТИ использован серийно выпускаемый модуль ГК-75, представляющий собой термостабилизированный управляемый напряжением генератор производства компании "Морион" г. С-Петербург [5], имеющий относительную нестабильность частоты не хуже чем 10^{-7} . Процедура точной подстройки частоты, проводимая перед каждым измерительным сеансом под эталонный сигнал, получаемый с приемника навигационной системы GPS, снижает нестабильность временных параметров станции до 10^{-9} . В функции GPS приемника также входит обеспечение высокой точности синхронизации процесса регистрации сигналов в точке приема с работой генераторной установки.

Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму в приемной измерительной станции осуществляется с помощью входящих в состав БР четырех аналого-цифровых преобразователей (АЦП1 ÷ АЦП4). АЦП выполнены на основе 24-разрядных микросхем типа CS5534-BS, производимых фирмой Cirrus Logic (США) [6], которые позволяют регистрировать сигналы в диапазоне частот (0 ÷ 1,6) кГц, перекрывающем весь спектр регистрируемых при геофизических исследованиях сигналов. Выбранные микросхемы АЦП имеют встроенный прецизионный аналоговый усилитель входного сигнала, обеспечивающий высокоточные дискретные значения усиления, выбираемые из ряда (1; 2; 4; 8; 16; 32; 64).

Блоки усилителей (БУ1÷БУ4) обеспечивают усиление и предварительную фильтрацию слабых сигналов, поступающих от датчиков (Д1 ÷ Д4), а также подавление естественных и промышленных помех.

При регистрации электрических компонент электромагнитного поля в точке приема с помощью датчиков, выполненных в виде заземленного диполя, не удается полностью устранить явление электрохимической поляризации электродов этих датчиков. Это приводит к тому, что полезные слабые сигналы электрических датчиков наблюдаются на фоне большого медленно меняющегося тренда, обусловленного поляризацией электродов. Для устранения влияния напряжения поляризации в каждом БУ предусмотрена схема автоматической (программной) балансировки, обеспечивающая компенсацию этого напряжения перед проведением каждого измерительного сеанса. Входные цепи всех БУ выполнены с гальванической развязкой, что резко уменьшает влияние токов утечек, воспринимаемых регистрирующей аппаратурой как помехи.

Для калибровки измерительных каналов в состав приемной станции введен блок формирования тестовых сигналов (БФТС), основным элементом которого является программируемый цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), формирующий под управлением "программы-приложения" эталонные сигналы заданной формы. При калибровке проводится запись откликов измерительных каналов на подачу серии разнополярных импульсов прямоугольной формы. В результате обработки этих записей вычисляются значения коэффициентов усиления БУ и строится график переходной характеристики измерительного канала, высокая точность и стабильность поддержания которой определяют точностные параметры измерительной станции.

В качестве устройства приема и обработки цифровых данных в структуре измерительной станции используется внешний персональный компьютер (ПК), совместимый с IBM PC, работающий под управлением операционной системы Windows 2000/XP. Выбор в качестве устройства обработки, хранения и передачи данных персонального компьютера делает измерительную станцию универсальной и гибкой.

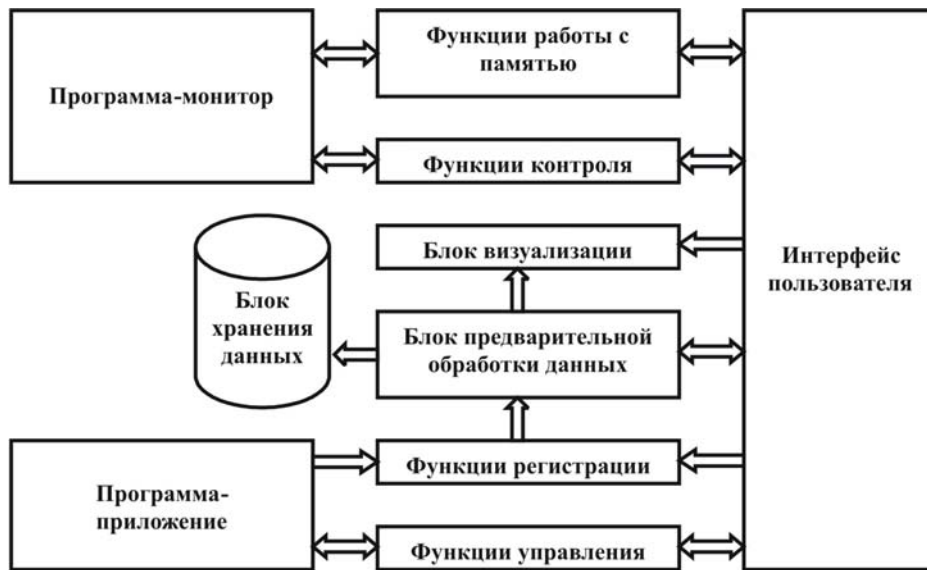


Рис. 2. Структурно-функциональная схема программного обеспечения приемной измерительной станции.

Все необходимые для питания блоков аппаратуры измерительной станции постоянные напряжения вырабатываются в блоке питания (на рис. 1 не показан), первичным источником для которого является аккумуляторная батарея (12 В) и альтернативный источник питания, обеспечивающий бесперебойную работу станции.

Программное обеспечение приемного измерительного комплекса и особенности алгоритмов обработки сигналов. Разработанный пакет программных средств регистрации и обработки сигналов программного обеспечения (ПО), являющийся неотъемлемой частью измерительного комплекса, выполнен с применением современных средств программирования и работает в среде Windows 2000/XP. При разработке ПО также принята функционально-блочная структура его построения (рис. 2). «Программа-монитор» – программа, прошитая в постоянную память микроконтроллера, выполняет функции загрузки и исполнения программ (*функции работы с памятью*) в оперативной памяти микроконтроллера и контроль его состояния (*функции контроля*). Связь с интерфейсом пользователя осуществляется посредством последовательного протокола передачи данных RS-232C. Все функции программы-монитора выполнены в виде внешней

библиотеки процедур, что позволяет легко разрабатывать программное обеспечение верхнего уровня (программы, выполняющиеся на персональном компьютере) без изменения программного обеспечения микроконтроллера.

«Программа-приложение» – программа на языке микроконтроллера, загружаемая в оперативную память микроконтроллера и выполняющая ряд функций, которые условно можно разбить на две группы: *функции регистрации и функции управления*.

Функции регистрации обеспечивают прием данных от АЦП и их передачу в персональный компьютер по скоростному протоколу EPP, используя алгоритм поиска и корректировки ошибок передачи данных.

Функции управления, обеспечивающие:

- 1) настройку параметров работы АЦП (частота дискретизации, коэффициент усиления), а также их точную калибровку при помощи встроенных регистров;
- 2) подстройку частоты ГТИ, формирующего тактовые импульсы для работы АЦП по сигналам GPS приемника;
- 3) автоматическую балансировку выхода БУ к центру шкалы АЦП по методу поразрядного уравнивания путем управления балансировочным ЦАП, установленным в БУ;

4) выбор одного из четырех значений частоты среза (2,5; 5,0; 10,0; 20,0) Гц низкочастотного фильтра БУ.

Функции управления и регистрации также выполнены в виде внешней библиотеки процедур и доступны программисту.

Блок предварительной обработки данных выполняет обработку зарегистрированных сигналов методом весового синхронного накопления [7, 8]. Основное достоинство этого метода заключается в том, что за счет весового суммирования с последующим осреднением синхронных отсчетов происходит фильтрация медленных трендов и подавление высокочастотных составляющих в спектре поступающих сигналов, при этом форма полезного сигнала не искажается.

Блок визуализации обеспечивает работу измерительной станции в режиме осциллографа. График временной функции сигнала, приведенный к входу АЦП, выводится на экран видеомонитора внешнего компьютера в режиме реального времени. Обеспечивается одновременный вывод на экран до четырех сигналов.

Блок хранения данных выполняет функции формирования файлов первичных сигналов и полученных в результате их предварительной обработки, а также их паспортов, содержащих все сведения об условиях регистрации.

Блок интерфейса пользователя предназначен для обеспечения управления всеми функциями измерительной системы под руководством оператора.

Отличительными особенностями разработанного пакета программных средств приемного измерительного комплекса являются:

1) возможность контроля качества получаемых данных на всех стадиях их прохождения и обработки;

2) возможность сохранения в памяти внешнего компьютера и далее на CD-дисках как первичных регистрационных данных, так и результатов их предварительной обработки;

3) применение специальных алгоритмов выделения и накопления полезных сигналов на фоне значительных помех совместно с высокой стабильностью и точностью выполнения процедур синхронизации обеспечивает повышенную точность измерения отсчетов кривой становления поля, что создает предпосылки для измерения более слабых вариаций удельного сопротивления горных пород при организации мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры.

Результаты испытаний макетного образца приемной измерительной станции. В результате проведенной разработки был изготовлен макетный образец типовой приемной станции. Проведены его испытания, подтвердившие полное соответствие полученных в процессе испытаний характеристик и параметров станции требованиям технического задания на разработку. Алгоритм весового синхронного накопления полезных сигналов в условиях малых соотношений сигнал-шум изучали в лабораторных условиях (рис. 3). В качестве источника сигналов применялся специально изготовленный имитатор, обеспечивающий с помощью сигналов, поступающих от GPS-приемника формирование последовательности двуполярных прямоугольных импульсов с высокоточным периодом повторения (10 ± 10^{-8} сек.).

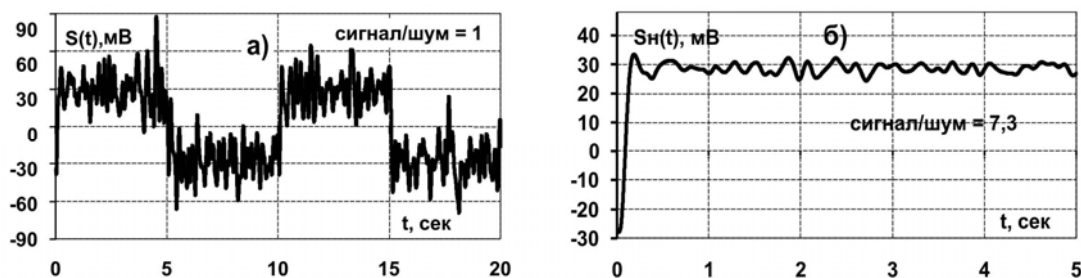


Рис. 3. График первичного зарегистрированного сигнала имитатора (а) и полученного в результате применения процедуры синхронного весового накопления (б), время накопления 10 мин.

В качестве шумового сигнала к прямоугольным импульсам в виде аддитивной суммы замешивался сигнал, формируемый специальным генератором белого шума, входящим в состав имитатора сигналов.

Графики зарегистрированного сигнала имитатора и полученного в результате применения процедуры весового синхронного накопления (рис. 3а, б), показывают значительное улучшение соотношения сигнал-шум (в 7,3 раза) после применения процедуры синхронного накопления, при этом форма зарегистрированных полезных сигналов определяется только переходной характеристикой измерительного канала.

Были проведены испытания макетного образца приемной станции в составе действующей системы электромагнитного мониторинга, результаты которых указывают на существенные преимущества новой измерительной станции по сравнению с используемыми в настоящее время одноканальными станциями КИЦ. Испытания проводились на стационарном приемном пункте Таш-Башат в течение двух месяцев. Одноканальная станция КИЦ работала в типовом режиме. Каждые сутки

проводилось по 6 измерительных сеансов. Станция КИЦ поочередно подключалась к одному из двух датчиков (электрические диполи, ориентированные в направлении север-юг и запад – восток). Два канала испытываемого образца новой многоканальной измерительной станции были всегда подключены к датчикам сигналов. Первичные сигналы датчиков и сигналы, полученные в результате их обработки с помощью алгоритма весового синхронного накопления, зарегистрированы макетным образцом измерительной станции в пункте Таш-Башат (рис. 4).

Приведенные графики демонстрируют высокую эффективность работы алгоритма весового синхронного накопления на реальных сигналах, снимаемых с электрических диполей. Наблюдается многократное (не менее чем в 10 раз) улучшение соотношения сигнал – помеха.

По результатам двухмесячной регистрации сигналов на приемном измерительном пункте Таш-Башат построены сравнительные временные ряды величин синхронных отсчетов кривых становления поля, полученных с помощью станции КИЦ и макетного образца новой измерительной станции (рис. 5).

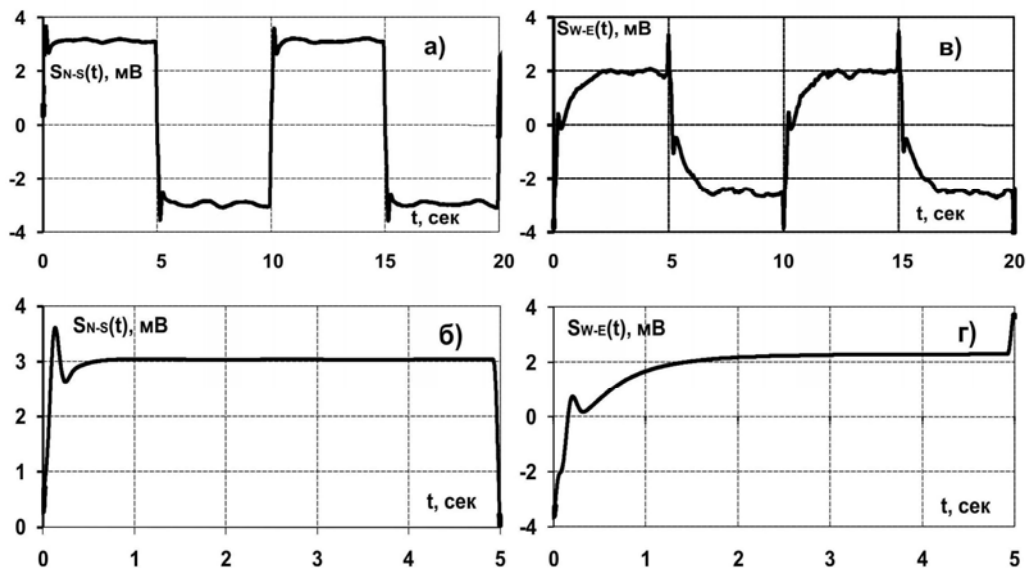


Рис. 4. Графики первичных сигналов (фрагменты длительностью в два периода), зарегистрированных в измерительном пункте Таш-Башат от двух диполей, ориентированных в направлении север-юг (а) и запад-восток (в), и результат их обработки с помощью весового синхронного накопления (б) и (г). Время накопления первичных сигналов – 10 мин.

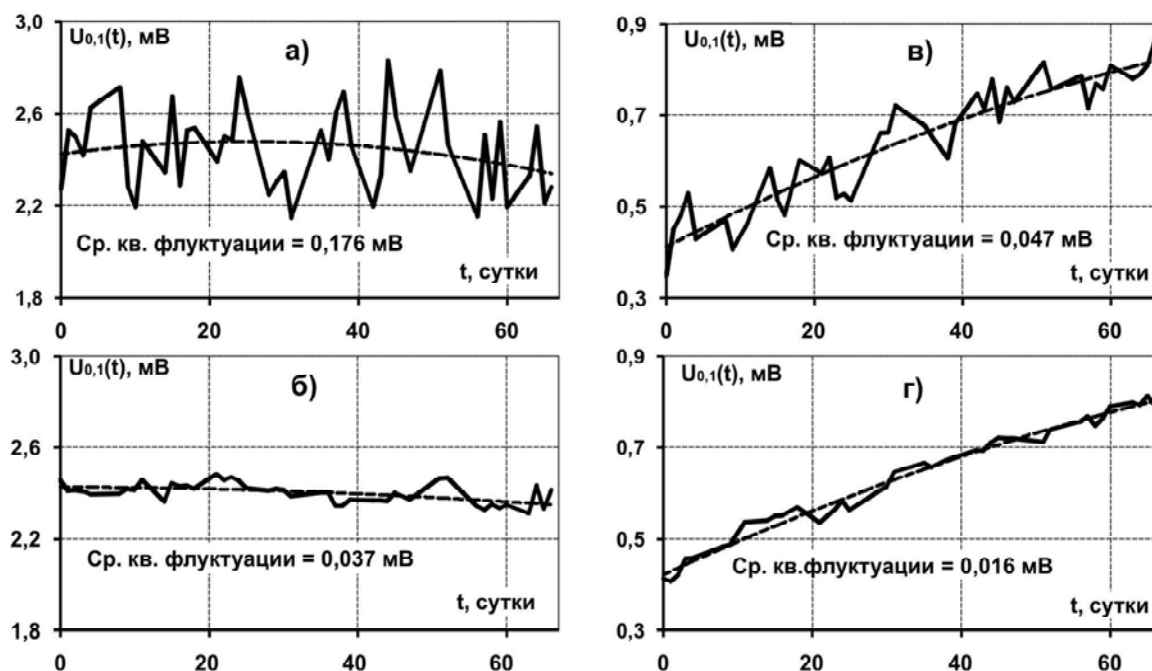


Рис. 5. Временные ряды, построенные по отсчетам кривых становления поля в точке 0,1 с, измеренных станцией КИЦ (а, в) и макетным образцом новой станции (б, г); измерительный пункт Таш-Башат; (а, б) – диполь север-юг; (в, г) – диполь запад-восток; пунктиром показаны линии трендов.

Ряды строились для малых времен кривых становления поля, где точность синхронизации и стабильность временных параметров регистрации оказывают наибольшее влияние на погрешность измерения отсчетов кривой становления поля. Графики временных рядов показывают многократное уменьшение среднеквадратичных флуктуаций относительно линий тренда, наблюдаемых во временных рядах, построенных по данным измерений, выполненных на макетном образце новой станции по сравнению с флуктуациями, наблюдаемыми в рядах, построенных по данным, полученным с помощью станции КИЦ. Для диполя запад-восток снижение флуктуаций составило около трех раз, а для диполя север-юг флуктуации уменьшились почти в пять раз.

Таким образом, результаты лабораторных испытаний и натурных измерений, выполненных на макетном образце приемной измерительной станции, подтверждают правильность принятых при разработке технических решений.

Выводы

Разработан типовой программно-аппаратный приемный измерительный комплекс для современной системы электромагнитного мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры в сейсмоактивных зонах, предназначенный для регистрации и предварительной обработки сигналов электрического поля, наблюдаемых на поверхности земли в приемных измерительных пунктах.

Аппаратура нового измерительного комплекса обладает существенно лучшими характеристиками (многоканальность, широкополосность, высокая чувствительность) по сравнению с существующим прототипом.

Литература

1. Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. – Киев: Наукова думка, 1981. – 296 с.
2. Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Ильичев П.В., Орленко Н.Н., Иванов Е.И., Матикс А.И. Электроразведочная станция. Свидетельство

- на полезную модель № 3329 от 16 декабря 1996 г.
3. Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Ильичев П.В., Орленко Н.Н., Иванов Е.И., Матикс А.И., Конавалов С.М. Геофизическая система сбора и обработки информации. Патент на изобретение № 2091820 от 27 сентября 1997 г.
 4. Электроразведка: Справочник геофизика: В 2 кн. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 438 с.
 5. <http://www.morion.com.ru> Официальный сайт компании Морион.
 6. <http://www.cirrus.com> Официальный сайт компании Cirrus Logic.
 7. Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. и др. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. – М.: Наука, 1993. – 158 с.
 8. Брагин В.Д. Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогностического полигона: Дисс... канд. физ.-мат. наук. – М.: Институт Физики Земли РАН, 2001.