

АППАРАТУРА ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ „ЭМС“**А.К. Манштейн, Г.Л. Панин, С.Ю. Тикун***Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Приводятся результаты разработки наземного индукционного прибора для исследования распределения электропроводности грунтов в задачах инженерной геофизики. Показана принципиальная схема устройства, в котором реализованы предельные технические возможности измерения гармонического сигнала на земной поверхности. Цифровая регистрация и узкополосная фильтрация синхронного детектирования позволили получить достаточную точность измерения сигнала величиной около 1 мкВ, подавление помехи промышленной частоты более 100 дБ. Дано описание практических методов измерения технических характеристик электроразведочной аппаратуры. Обсуждается оценка точности результатов измерений.

Электропроводность горных пород, электронные методы и приборы в измерительной технике, частотное электромагнитное индукционное зондирование.

A DEVICE FOR SHALLOW FREQUENCY-DOMAIN ELECTROMAGNETIC INDUCTION SOUNDING**A.K. Manshtein, G.L. Panin, and S.Yu. Tikunov**

We have designed a frequency-domain electromagnetic induction sensor for imaging the distribution of electrical conductivity of soils in civil engineering applications. The device implements the ultimate technical feasibility of measuring harmonic signals on the ground surface. Digital recording and narrow bandpass filtering of synchronous detection allows a sufficient measurement accuracy for ~1 μV signals and suppression of power-line noise of more than 100 dB. We suggest practical methods for investigating the characteristics of the sensor and estimating its measurement accuracy.

Electrical conductivity of soils, electronic measurement and instrumentation, frequency-domain electromagnetic induction sounding

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие 30 лет интенсивно развивались и получили практическое применение методы геофизических исследований, основанные на использовании переменных электромагнитных полей, среди которых широкое распространение получил метод частотных электромагнитных зондирований (ЧЭЗ). основополагающие работы по теории метода принадлежат Л.Л. Ваньяну, А.А. Кауфману, Г.М. Морозовой, Л.А. Табаровскому, М.И. Эпову [Дипольные..., 1980] и другим геофизикам.

Данная работа посвящена описанию аппаратуры электромагнитного сканирования (ЭМС) — наземного метода ЧЭЗ. Аппаратура состоит из трехкатушечного индукционного зонда с магнитными диполями, моменты которых параллельны между собой и перпендикулярны оси прибора. Генераторная катушка диаметром 0.32 м расположена на одном конце зонда длиной 2.5 м. На другом конце, внутри трубы размещены две приемные катушки, включенные встречно для осуществления режима геометрической фокусировки, они изготовлены таким образом, что их моменты достаточно постоянны на всех рабочих частотах [Манштейн и др., 2000].

Аппаратура ЭМС (рис. 1) предназначена для исследования распределения электропроводности на глубину до 10 м в различных средах: контроля состояния инженерных сооружений, поиска и локализации захоронений промышленных отходов, источников и объемов утечки жидкостей, определения мест прокладки металлических труб, выделения пустот и для других целей [Балков и др., 2006]. Зондирование выполняется посредством последовательного измерения электропроводности грунта на 14 дискретных частотах (f_i) гармонического сигнала в диапазоне 2.5—250 кГц. Глубина зондирования пропорциональна $1/f^{0.5}$. Пример применения аппаратно-программного комплекса ЭМС представлен на рис. 2, схематически устройство аппаратуры дано на рис. 3. Цикл измерения на каждой частоте имеет два последовательных этапа. Первый этап — измерение прямого поля, второй — компенсированного сигнала от токов в изучаемой среде. Далее в процессе обработки по значению прямого поля определяется величина тока в генераторе, на которую нормируются сигналы реальной и мнимой компонент вторичного поля. Для измерения прямого поля применяется дополнительная катушка, размещенная внутри генератора.

ПРИНЦИП ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА

Для уменьшения электрических наводок катушки L_1 и L_2 (см. рис. 3), а также все другие электронные схемы помещены в электростатические экраны. Входной усилитель собран на основе инструментального



Рис. 1. Аппаратура ЭМС в рабочем состоянии.

усилителя INA163 с нормированным коэффициентом шума $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$. Поскольку частота интенсивных промышленных помех (50 Гц) лежит намного ниже минимальной частоты измерения, а частоты эфирных (в основном длинных волн) выше максимальной рабочей частоты, то после входного усилителя следует фильтр с полосой пропускания в диапазоне 1—300 кГц (полосовой фильтр).

Поэтапное развитие узлов ЭМС от одного экземпляра к другому выявило принципиальное направление построения измерительного тракта для аппаратуры такого класса. Лучшие результаты получены при использовании метода синхронного детектирования, он дает возможность проводить фазовую селекцию и является оптимальным для достижения наивысшей чувствительности в измерении двух компонент сигнала — мнимой, которая синфазна с максимумом тока в генераторной петле, и реальной, опережающей мнимую на 90° .

Из теории сигналов известно, что наилучший прием на фоне шумов обеспечивает согласованный фильтр, где полностью используется априорная информация о сигнале [Клаассен, 2002]. Философия, лежащая в основе применения синхронного детектора в аппаратуре ЭМС, состоит в том, что синхронному усилителю требуется опорный сигнал, который содержит информацию о частоте и фазе входного сигнала. Этот опорный сигнал, в нашем случае прямоугольной формы, генерируется вне усилителя. В аппаратуре ЭМС синхронный детектор состоит из аналогового коммутирующего детектора и цифрового полосового фильтра внутри аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (рис. 4).

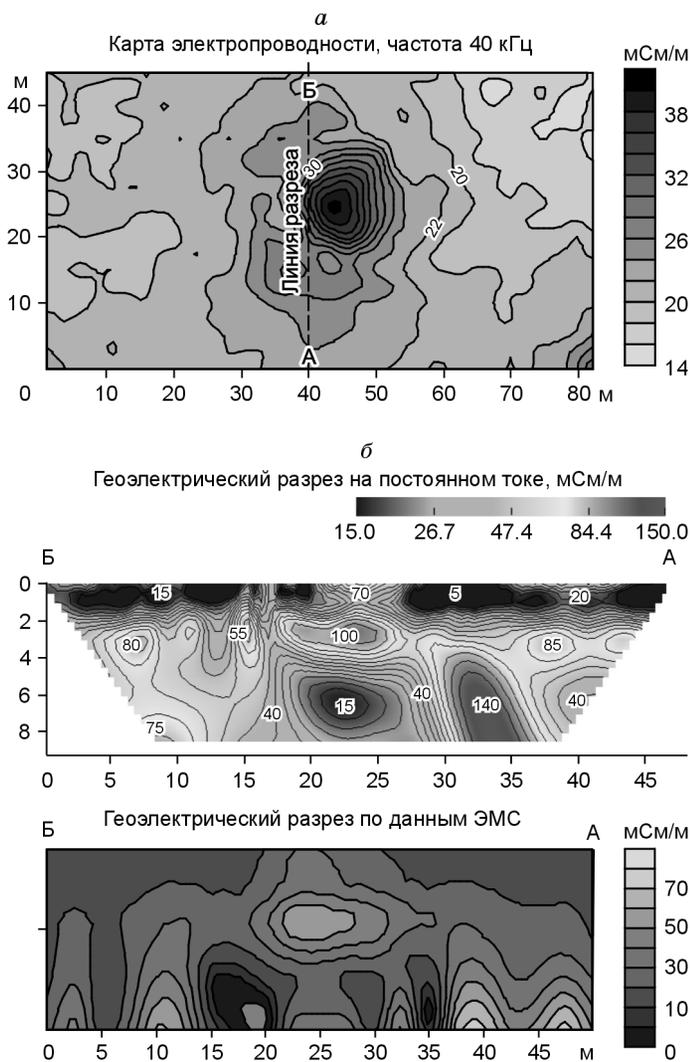


Рис. 2. Карта распределения электропроводности грунта: *a* — геoeлектрический разрез по данным ЭМС, *б* — сравнительный разрез по данным ВЭЗ.

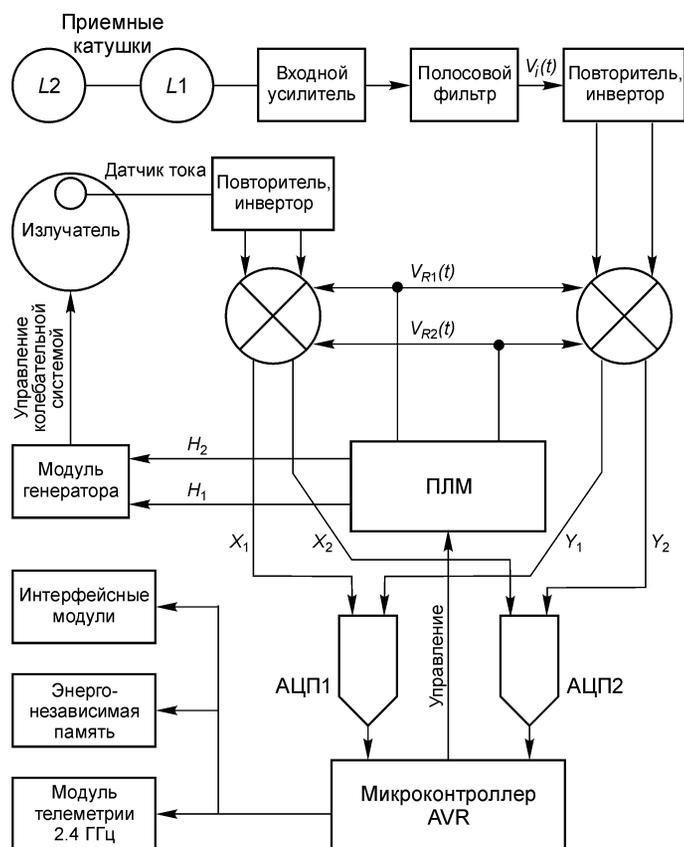


Рис. 3. Структурная схема аппаратуры ЭМС.

На выходе коммутирующего детектора полярность измеряемого входного сигнала $V_i(t)$ меняется со скоростью, определяемой прямоугольным опорным сигналом $V_R(t)$. Этот процесс можно представить как перемножение сигнала

$$V_i(t) = V_i \cos(\omega_i t + \phi)$$

и прямоугольного колебания, принимающего значения 1 или 0 с частотой ω_R . Математически это записывается в виде

$$V_s(t) = \frac{4}{\pi} V_i(t) \left(\cos \omega_R t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_R t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_R t - \dots \right).$$

Для зашумленного периодического входного сигнала $V_i(t)$ и при условии $\omega_i = \omega_R$ (случай синхронного детектирования) выходной сигнал $V_s(t)$ содержит постоянную составляющую, равную

$$V_0(t) = \frac{2}{\pi} V_i \cos \phi.$$

Кроме этого, выходной сигнал содержит гармонические составляющие с частотами, равными сумме и разности частот ω_i со всеми нечетными гармониками частоты ω_R . Для n -й гармоники частоты ω_R амплитуды этих составляющих имеют весовой коэффициент $1/n$.

Особенностью работы аппаратуры является измерение амплитуды периодического немодулированного сигнала в двух фазах, сдвинутых на 90° , причем информация содержится в узком частотном спектре [Балков, Манштейн, 2001]. Измерение сигнала от приемных катушек или от датчика прямого поля осуществляется в двух одновременно работающих синхронных детекторах. На рис. 4 опорные сигналы прямоугольной формы обозначены как $V_{R1}(t)$ и $V_{R2}(t)$. Далее сигналы подаются на фильтры нижних частот с частотой среза 300 Гц. После фильтров измеряемые сигналы в виде постоянной составляющей с оставшимися помехами поступают на сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь. Трехканальный сигма-дельта 24-разрядный преобразователь AD7799 имеет сверхнизкий среднеквадратичный уровень

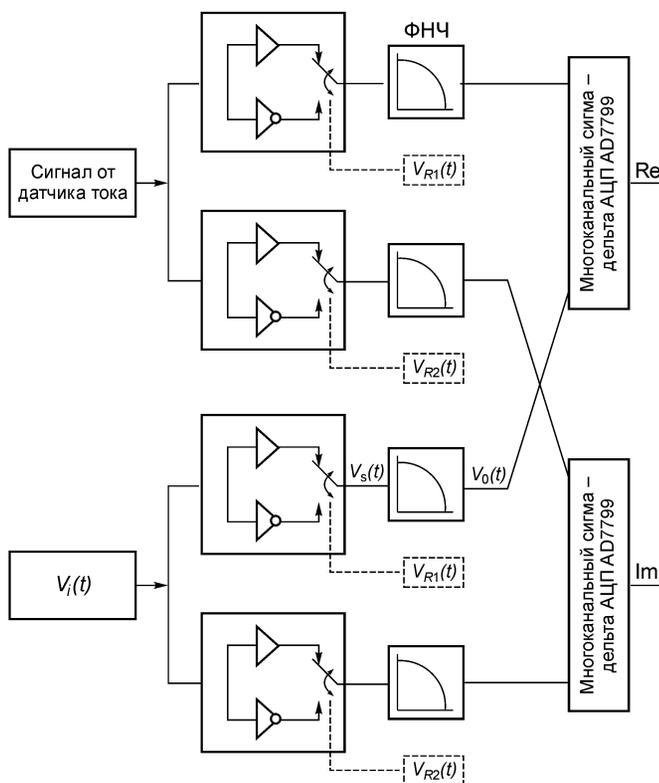


Рис. 4. Блок-схема двухканального синхронного детектора.

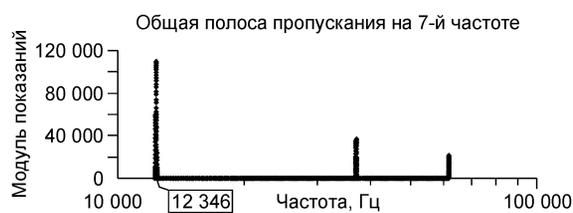


Рис. 5. Экспериментальная спектральная чувствительность измерительного тракта по отношению к входному сигналу.

шумов (27 нВ), температурный дрейф напряжения смещения нуля 10 нВ/°С и ослабление сетевой помехи не менее 100 дБ [AD7799]. При времени преобразования АЦП 60 мс внутренний цифровой фильтр обеспечивает пропускание от постоянного сигнала до первого минимума (-20 дБ) на частоте $f_0 = 10$ Гц. Таким образом, измеряемые компоненты чувствительны к сигналу в полосе частот $2f_0$ симметрично относительно нечетных гармоник опорной частоты f_R . При детектировании с помощью схемы умножения и фильтра нижних частот спектр входного сигнала с шириной полосы $2f_0$ переносится в диапазон низких частот от 0 до f_0 . Синхронное детектирование позволяет измерять амплитуду и фазу очень малых и зашумленных сигналов, занимающих относительно

узкий диапазон частот, что имеет место в аппаратуре частотных зондирований, в которой первичное поле генерируется в виде синусоиды резонансным контуром с управляемой фазой излучаемого поля.

Сигнал от датчика прямого поля имеет большой уровень, преобладает над помехами и потому время преобразования в АЦП установлено 4 мс, что соответствует полосе 0—500 Гц [AD7799].

На рис. 5 изображена реальная спектральная чувствительность коммутирующего детектора с фильтром нижних частот, имеющим полосу шириной $2f_0$. Спектральная чувствительность в приборе ЭМС имеет малую мощность гармоник входного сигнала в результате совместной работы додетекторного полосового фильтра (см. рис. 3) и цифрового фильтра НЧ после коммутатора.

Основным достоинством коммутирующего детектора является то, что его работу можно сделать почти идеальной в большом диапазоне частот и амплитуд входного сигнала. Большой динамический диапазон необходим для измерения сигналов, „утоновших“ в шуме и помехах.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОМ

Генератор представляет собой систему с фазовым управлением возбуждения. Модуль генератора (см. рис. 3) состоит из узла возбуждения и системы связанных контуров (контур накачки и резонансный контур). Кроме того, для достижения резонанса на каждой частоте контур подключен к блоку коммутируемых емкостей. Генератор излучает переменное когерентное магнитное поле. Экспериментально установлено, что фаза излучаемого электромагнитного поля постоянна и не зависит от свойств естественных грунтов. Только при близком расположении металлических объектов прямое поле реагирует на это изменением фазы.

Формирователь опорных сигналов синтезирует сигналы накачки генераторной петли (H_1 , H_2) и парафазные сигналы управления коммутирующими детекторами ($V_{R1}(t)$, $V_{R2}(t)$). Формирователь реализован на программируемой логической матрице (ПЛМ) типа Atera EPM3064, содержащей делитель с переменным коэффициентом деления, систему управления, делитель постоянного коэффициента деления, логику селекции сигналов накачки (рис. 6).

Выходной сигнал $V_{R1}(t)$ является источником формирования импульсов для ключей накачки переменного тока в контуре излучателя. Выходные сигналы модуля показаны в правой части рис. 6.

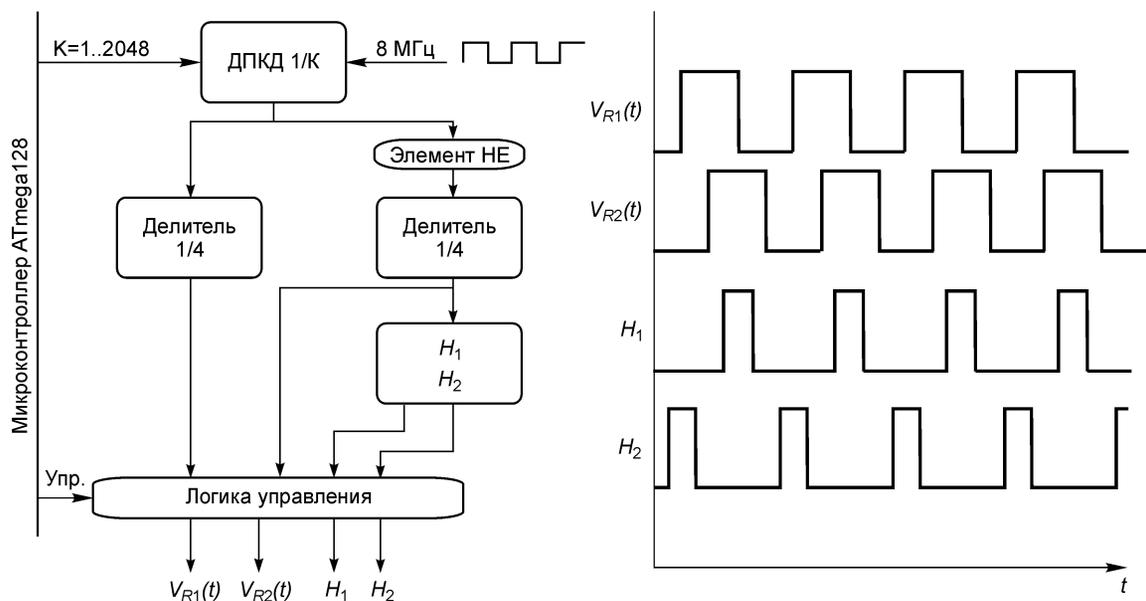


Рис. 6. Система управления генератором ЭМС.

При изучении точности работы аппаратуры необходимо оценить повторяемость сигнала, измерить полосу пропускания измерительного тракта, исследовать линейность преобразования сигнала в цифровую форму, зависимость фазы излучения электромагнитного поля от температурного изменения емкости в резонансном контуре излучателя. При этом определим допустимое изменение температуры окружающей среды не больше чем на $\pm 10^\circ\text{C}$. Примем, что изменение линейных размеров устройства за счет изменения температуры пренебрежимо мало.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ ПРИЕМНОГО ТРАКТА

Полоса пропускания измерителя исследовалась с отключенным собственным генератором. Подключение внешнего генератора осуществлялось после включения питания аппаратуры и „чтения нуля“. Процедура „чтение нуля“ состоит в измерении шумов, когда при отключенных сигналах накачки генераторной петли производится прием по обоим каналам (Re и Im). В дальнейшем эти сигналы от эфирных шумов (для каждой используемой частоты) вычитаются из сигналов, измеренных с включенным генератором ЭМС.

С помощью высокостабильного внешнего генератора синусоидального сигнала (ГЗ-110) и многовитковой петли создавалось переменное магнитное поле вблизи приемных катушек. Аппаратура включалась на одну из рабочих частот, а внешний генератор включался на частоту, отстоящую от рабочей на 100 Гц. Выполнялось измерение двух компонент сигнала. Далее внешний генератор перестраивался на частоту, отстоящую на 98 Гц от рабочей и выполнялось измерение, затем тоже через 2 Гц. Таким образом, определялась амплитудно-частотная характеристика измерительного тракта от приемников до цифрового вида сигнала. Характеристика представлена в виде графика изменения модуля регистрируемого сигнала в зависимости от частоты. Экспериментально установлено, что полоса пропускания равна 20 Гц ($2f_0$, рис. 7). Также были произведены замеры пропускания гармоник.

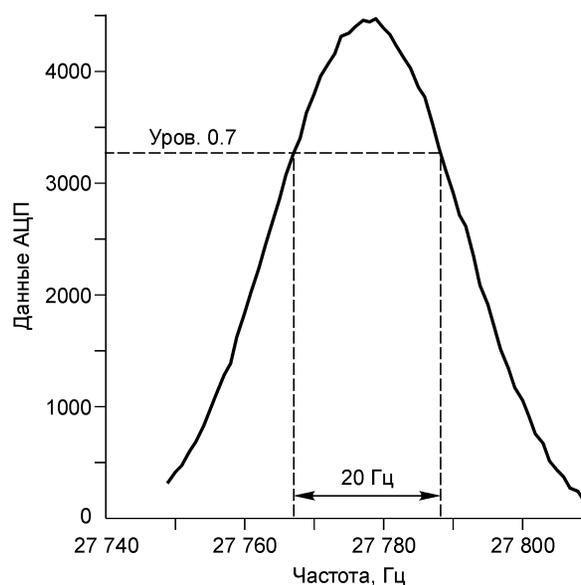


Рис. 7. Полоса пропускания вблизи частоты 27779 Гц.

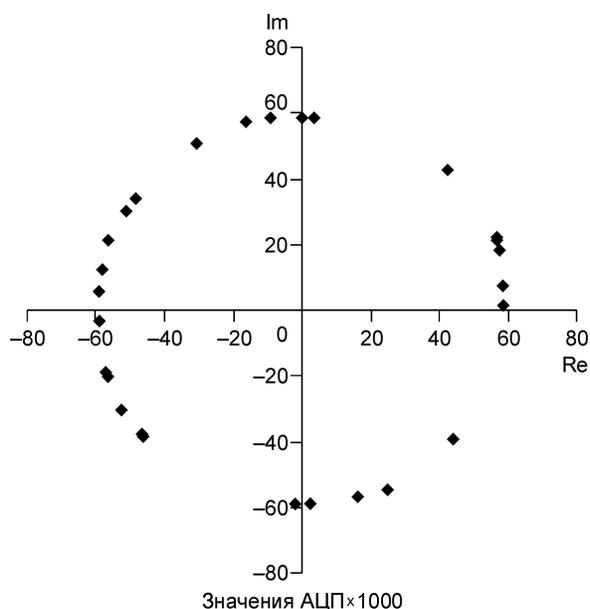


Рис. 8. Результат случайных измерений мнимой и реальной компонент поля от внешнего генератора.

В случае включения внешнего генератора перед включением ЭМС (что соответствует реальному режиму работы, так как шумы присутствуют постоянно), сигнал от внешнего генератора принимался за ноль.

По итогам экспериментальных работ установлено, что полоса пропускания одинакова на всех частотах. На рис. 7 показана амплитудно-частотная характеристика измерительного тракта на частоте 27779 Гц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА В ЦИФРОВУЮ ФОРМУ

Линейность преобразования принимаемого сигнала в цифровую форму подразумевает отсутствие амплитудно-фазовых искажений в измерительном

тракте. Экспериментально исследовалась линейность передачи сигнала через приемные цепи, а именно коммутирующей детектор и преобразователь в цифровую форму при любой фазе сигнала. Одновременно проверялся алгоритм первичной обработки сигнала в микроконтроллере. Источником поля служила внешняя петля, питание которой осуществлялось гармоническим током от высокостабильного генератора сигналов (ГЗ-110) на выбранной рабочей частоте аппаратуры ЭМС. Петля располагалась вблизи приемных катушек. Уровень поля задавался таким, чтобы не перегружать аналоговые цепи. При этом следует учесть, что генератор ЭМС отключен.

Из законов статистики следует, что графическое изображение реальной и мнимой компонент измеренного таким образом поля будет образовывать на плоскости окружность при условии отсутствия искажений и при условии, что при постоянной внешней генерации время начала измерения будет выбираться случайно. На рис. 8 представлен результат измерения для одной частоты, такие же результаты получены и для всех остальных частот прибора. Как видно, точки образуют окружность, центр которой находится около нуля (0.0). Радиус окружности отклоняется от среднего значения не более чем на 1.2 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЕМКОСТИ В РЕЗОНАНСНОМ КОНТУРЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Главным дестабилизирующим фактором емкости является температура окружающей среды. Изучалось влияние на сигнал изменения температуры прибора в пределах $\pm 10^\circ\text{C}$. Этот диапазон является достаточным для учета влияния изменения температуры воздуха в течение рабочего дня. Исследования выполнялись методом измерения фазы ЭДС в пробной петле относительно импульсов накачки генераторного резонансного контура (L) с помощью воздушного переменного конденсатора (ΔC), припаянного параллельно к штатному конденсатору контура. Измерения проводились с помощью двухлучевого электронного осциллографа. Схема эксперимента представлена на рис. 9. При изменении величины дополнительной емкости ΔC на 6 % от величины C_0 на экране осциллографа наблюдалось перемещение синусоидального сигнала на 25° относительно прямоугольных импульсов. Отсчет временной задержки переводится в градусы через измерение фазы периода колебаний на этом же экране. Пробная петля имеет малое количество витков и ее амплитудно-частотная характеристика не искажает преобразования потока магнитного поля в ЭДС для всех частот рабочего диапазона. График фазы

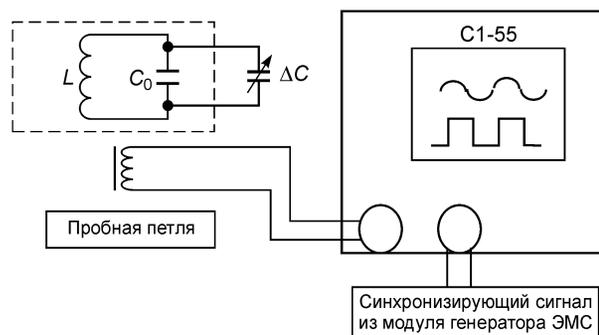


Рис. 9. Схема измерения фазы излучаемого электромагнитного поля в зависимости от изменения емкости резонансного контура.

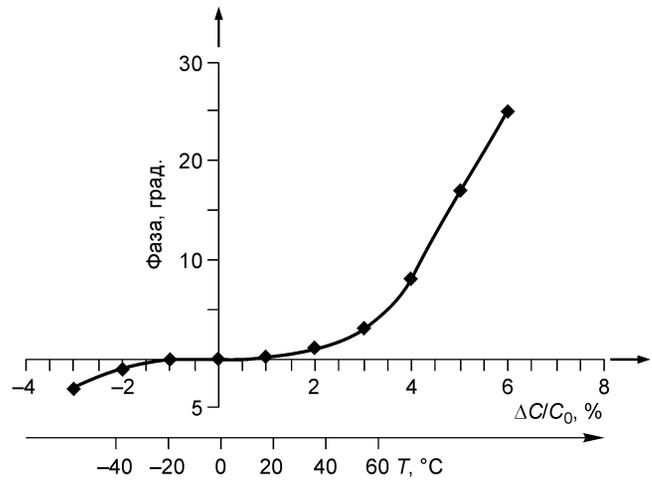
Штриховой линией выделены элементы аппаратуры ЭМС.

Рис. 10. Экспериментальная зависимость фазы излучения от изменения емкости резонансного контура и ориентировочная шкала прироста температуры.

излучения в зависимости от изменения емкости резонансного контура приведен на рис. 10. На оси абсцисс отложены значения $\Delta C/C_0$ в %. На оси ординат — значения фазы (в градусах) синусоидального сигнала, считанного с экрана осциллографа.

Выполненные в лаборатории многократные измерения ТКЕ — температурного коэффициента применяемых емкостей К73-17 — дали среднюю величину, равную $5 \cdot 10^{-4}/\text{град}$. Учиты-

вая, что $\text{ТКЕ} = \Delta C/C_0 \Delta T$, где ΔT — прирост температуры конденсатора, величина $\Delta C/C_0 = 2\%$ будет достигаться с приростом температуры на $40\text{ }^\circ\text{C}$. Этот факт является доказательством достаточной стабильности фазы излучения генераторным устройством аппаратуры ЭМС при изменении температуры конденсатора на $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$. Изменение фазы излучаемого электромагнитного поля в диапазоне $\pm 1^\circ$ происходит при изменении температуры окружающей среды на $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$, что не ограничивает применение аппаратуры.



ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные по оценке точности были получены из эксперимента, организованного и проанализированного в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Устройство аппаратуры таково, что при отсутствии полезного сигнала результат измерений равен нулю со стандартным отклонением повторяемости не более трех единиц для пятиразрядной десятичной шкалы. Этот сигнал называется „нулевым“, и он определяется для каждой частоты при подъеме прибора на высоту 10 м над поверхностью земли. Нулевой сигнал является систематической составляющей погрешности в условиях повторяемости. Эти значения записываются в электронную память измерителя и при каждом измерении автоматически вычитаются из сигнала.

Так как точность измерений полезного сигнала в данной аппаратуре не зависит от лабораторий, выполняющих работу, то, как и указано в ГОСТе, возможно применить статистический анализ для модели, где каждый результат измерений (y) представляет собой сумму $y = m + e$, где m — общее среднее значение (математическое ожидание); e — случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости.

При обработке данных выбросы не были включены в расчет стандартных отклонений повторяемости.

Оценка пределов повторяемости случайной составляющей погрешности получена из эксперимента, в результате которого построены графики распределения флуктуаций сигнала для нескольких его уровней: ~ 500 ; ~ 3000 ; $> 25\ 000$. Статистическому анализу подвергались выборки более чем из 200 значений $\text{Re}(U_i)$ и значений $\text{Im}(U_i)$ на каждой из 14 частот. За наиболее вероятное значение сигнала принято среднее арифметическое U . Построены гистограммы распределения флуктуаций каждого сигнала с аппроксимацией функцией вида плотности нормального распределения

$$\varphi(U_i) = e^{-(U_i - U/\sigma)^2}.$$

Здесь U_i — измеренное значение сигнала в i -й из 200 реализаций; σ — дисперсия в степени $1/2$, которую называют среднеквадратическим отклонением (СКО). Среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание случайной величины имеют ту же размерность, что и сама измеряемая величина. Гистограммы строились следующим образом. Для каждого значения U_i рассчитывалось относительное отклонение от среднего значения. Определялся интервал отклонений, т. е. минимальное и максимальное значения $\pm(U_i - U)$. Далее задавалась величина $\Delta\sigma$ (шаг дискретизации флуктуаций) и интервал относительных отклонений делился на $\Delta\sigma$, чем определялось число разбиений по оси абсцисс. Таким образом определялись границы интервалов разбиений. В этих интервалах подсчитывалось количество событий (N) — количество измерений с данной флуктуацией от среднего. Далее определялось максимальное число

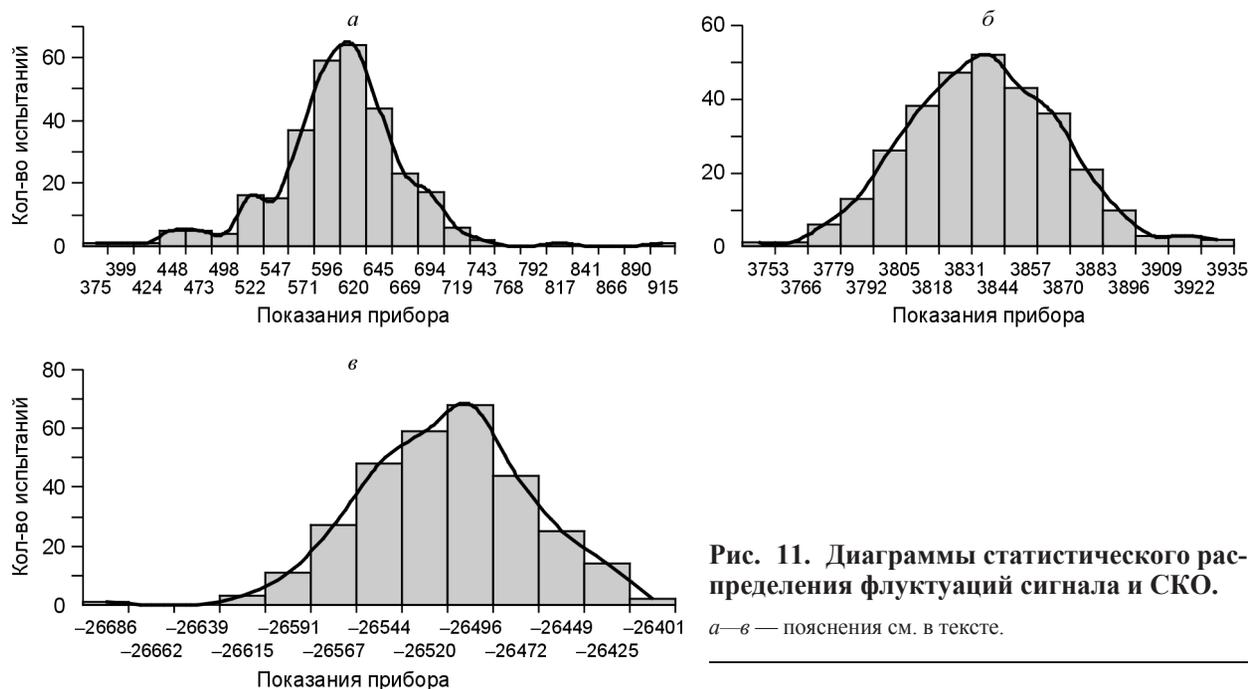


Рис. 11. Диаграммы статистического распределения флуктуаций сигнала и СКО.

a-v — пояснения см. в тексте.

событий N_{\max} . На оси ординат гистограммы откладывалась относительная частота событий N/N_{\max} , а на оси абсцисс — относительное отклонение $(U_i - U)/U$ в %.

На рис. 11 в виде примера представлены диаграммы распределения многократных измерений компонент сигнала на разных частотах. Огибающая кривая, проведенная через центры столбцов, характеризует вид распределения как нормальное, соответствующее закону распределения Гаусса [Левин, 1960]. Анализ гистограмм распределения многократных измерений аппаратурой ЭМС в конкретных условиях для доверительной вероятности 95 % позволяет сделать следующие заключения.

Для случая, когда среднее значение сигнала равно величине 596,2, СКО составляет 60,9 единиц или 10,2 % от уровня сигнала (см. рис. 11, *a*).

Для уровней сигналов примерно 3835 СКО составляет 30,4 единиц, и интервал неопределенности равен $\pm 0,8$ % (см. рис. 11, *b*).

Для уровня сигналов 26520 СКО равен 43,2 единиц, интервал неопределенности составил $\pm 0,16$ % (см. рис. 11, *v*).

Полученные оценки справедливы для имеющегося уровня электромагнитных помех, в которых находился ЭМС во время эксперимента. Расчет значений σ можно быстрее выполнить через оценку дисперсии случайной величины относительно среднего значения. Выполнение таких измерений на участке проведения геофизических работ кроме определения интервалов достоверности измерений дает представление об уровне внешних помех.

Лабораторные определения чувствительности измерительного тракта аппаратуры дают среднюю величину 10 нВ на единицу пятиразрядного десятичного представления. Максимальное число, соответствующее наибольшему сигналу с приемных катушек равно 65535. Если определить допустимую наибольшую погрешность величиной ± 5 %, а среднеквадратическое отклонение принять равным 5 единиц, то минимальный измеряемый сигнал оценивается ± 1 мкВ. Максимальный измеряемый сигнал с учетом усиления имеет величину не более ± 310 мкВ.

В соответствии с ГОСТом выведена формула для оценки точности измерений. Формула рассчитывалась для шести уровней экспериментального сигнала и имеет вид

$$\delta = \pm \left(0,03 + \frac{87,4}{m} \right) \%,$$

где m — измеряемый уровень сигнала в единицах АЦП пятиразрядного десятичного представления.

ВЫВОДЫ

Приведенное описание аппаратуры ЭМС демонстрирует одну из возможных реализаций компактной аппаратуры электромагнитного частотного зондирования. Опыт эксплуатации приборов показывает высокую повторяемость измерений переменных ЭДС на частотах до 300 кГц. Примененный тип детектиро-

вания обеспечил линейный вид преобразования амплитуды переменного сигнала в постоянную составляющую. Предлагаемый метод оценки точности результатов измерений является достаточным для данной аппаратуры.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 06-06-80295а) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 109.

ЛИТЕРАТУРА

Балков Е.В., Манштейн А.К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании // Геофизический вестник ЕАГО, 2001, № 12, с. 17—20.

Балков Е.В., Манштейн А.К., Чемякина М.А., Манштейн Ю.А., Эпов М.И. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач // Геофизика, 2006, № 1, с. 43—50.

Дипольные частотные зондирования двухслойной среды. Методические рекомендации. Ч. 1 / Ред. Г.М. Морозова. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1980.

Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М., Постмаркет, 2002, 352 с.

Левин В.И. Методы математической физики. М., Учпедгиз Минпросвещения, 1960, 242 с.

Патент РФ № 2152058 С1, G 01 V 3/10, от 24.06.98 Способ индукционного частотного зондирования / А.К. Манштейн, М.И. Эпов, В.В. Воевода, К.В. Сухорукова. 2000, Бюл. № 18, 1 с.

AD7799 Preliminary Technical Data. Site of Analog Device Company, www.analog.com.

*Рекомендована к печати 2 октября 2007 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
2 апреля 2007 г.*