

УДК 550.8.072

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Е. Ю. Копылов

Представлены результаты разработки и изготовления специального имитатора сигналов, обеспечивающего физическое моделирование сигналов в характерных точках схемы электроразведочного измерительного комплекса, разрабатываемого в Научной станции РАН для исследования особенностей применения шумоподобных сигналов в аппаратуре активной геоэлектроразведки земной коры.

Ключевые слова: имитатор сигналов; электроразведочный измерительный комплекс; шумоподобные сигналы; физическое моделирование.

SIMULATOR OF SIGNALS FOR ELECTROMAGNETIC PROSPECTING MEASURING SYSTEM

E. Y. Kopylov

The results of development and manufacture of special simulator signals to provide physical simulation of signals in the special points of the measuring complex are presented, it is developing in the Research station of the Russian Academy of Sciences to research application of the pseudonoise signals in the system of active geoelectric exploration of the Earth's crust.

Keywords: simulator of signals; geoelectric measuring complex; pseudonoise signals; physical simulation.

Рассматриваются результаты разработки и изготовления специального имитатора сигналов, предназначенного для проведения модельных экспериментов совместно с геоэлектроразведочным измерительным комплексом с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС), разрабатываемым в Научной станции Российской академии наук (НС РАН). Эти измерительные комплексы ЭРК ШПС планируется использовать в системе электромагнитного мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры, действующей на территории Бишкекского геодинамического полигона НС РАН.

В геоэлектроразведочной технике для контроля работоспособности и оценки технических характеристик измерительных комплексов обычно применяют специальные устройства, имитирующие свойства исследуемого объекта (земной коры). Примером такого рода приборов может служить устройство тестирования "TDEM-TEST" [1], позволяющее оперативно в полевых условиях осуществить проверку работоспособности измерительной аппаратуры "TSIKL-7", разработанной специалистами из Новосибирска и работающей так же, как и разрабатываемый измерительный комплекс с ШПС по методу зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). В основу работы системы (TSIKL-7) – (TDEM-TEST) положен принцип

использования геоэлектрической модели среды, известной как S плоскость, и сравнение измеренной и расчетной кривых для этой модели.

Для наилучшей оптимизации параметров отдельных блоков и узлов измерительного комплекса ЭРК ШПС требуется гибкое (оперативное) изменение параметров и характеристик тест-сигналов, имитирующих реальные сигналы в различных точках измерительного канала в широком диапазоне.

Устройство тестирования TDEM-TEST не удовлетворяет требованиям исследовательских задач, т. к. имитирует сигнал только в одной точке измерительного тракта, а именно: сигнал на выходе датчика в условиях упрощенной модели исследуемой среды в виде однородного полупространства с постоянной электропроводностью.

В работе [2] в результате математического моделирования электроразведочных систем с применением ШПС был получен положительный результат, свидетельствующий о высокой эффективности применения шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки. Однако первые полевые измерения, проведенные с помощью изготовленного измерительного комплекса, выявили отличия от результатов математического моделирования – появление так называемых "структурных" помех в результате корреляционной обработки

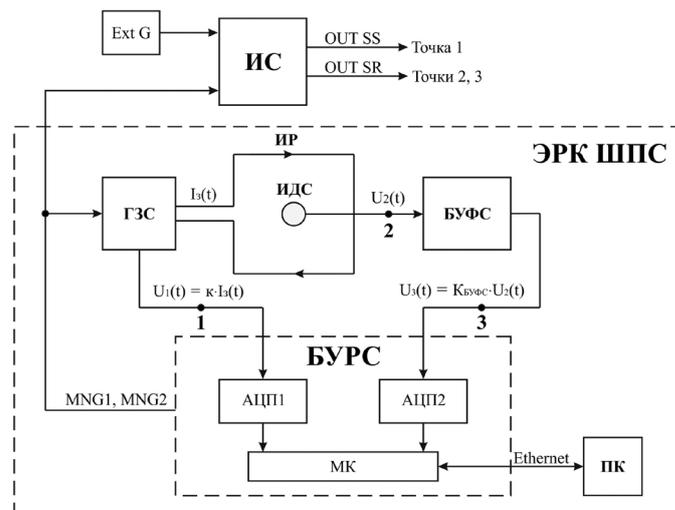


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема подключения имитатора сигналов к ЭРК ШПС: ИС – имитатор сигналов, Ext Gen – внешний генератор сигналов, ИДС – индукционный датчик сигналов, ИР – индукционная зондирующая рамка, ГЗС – генератор зондирующих сигналов, БУФС – блок усиления и фильтрации сигналов, БУРС – блок управления и регистрации сигналов, ПК – персональный компьютер, АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровые преобразователи, МК – микроконтроллер

принимаемых сигналов [3]. Можно предположить, что наличие таких помех определяется неидеальностью реального измерительного тракта (динамическая нелинейность, наличие внутренних синхронных помех). Поэтому возникла необходимость исследования зависимости формы и величины этих помех от параметров регистрируемых сигналов и характеристик измерительного канала с помощью специального имитатора сигналов.

На рисунке 1 показана схема подключения имитатора сигналов к ЭРК ШПС. Точками на схеме показаны цепи, в разрыв которых включается имитатор сигналов. ИС обеспечивает физическое моделирование следующих сигналов:

- импульсов тока в зондирующей индукционной рамке,
- входного сигнала индукционного датчика,
- выходного сигнала индукционного датчика,
- выходного сигнала БУФС.

С помощью имитатора моделируется сигнал на входе ИДС в виде потока магнитной индукции $B(t)$, наблюдаемого в точке приема. Принимаемый сигнал представляет собой сумму нескольких сигналов:

1. Сигнал прямого поля, определяется как

$$B_{np}(t) = \mu \cdot \mu_0 \cdot P_{ip} \cdot I_z(t),$$

где B_{np} – индукция магнитного потока, создаваемого прямым сигналом, распространяющимся через воздух; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума; μ – относительная магнитная проницае-

мость исследуемой среды. Для слабомагнитных сред, к которым относятся горные породы, слагающие земную кору, можно принять $\mu \approx 1$; P_{ip} – постоянная зондирующей рамки, определяемая через величину, обратную ее эффективному диаметру; $I_z(t)$ – ток в зондирующей рамке.

2. Сигнал становления поля, формируемый в земной коре, определяется как

$$B_{cn}(t) = \kappa_{np} \cdot [I_z(t) \otimes g(t)],$$

где $B_{cn}(t)$ – индукция магнитного потока, создаваемого токами, наведенными в земной коре (сигнал становления поля); κ_{np} – коэффициент пропорциональности, связывающий поле, создаваемое рамкой с зондирующим током; $g(t)$ – импульсная переходная характеристика земной коры (искомая характеристика).

3. Широкополосные шумы и помехи $B_{ш}(t)$ представляют собой сумму сигналов, создаваемых теплурическими токами в земной коре и собственных шумов измерительной аппаратуры. В первом приближении, эти помехи можно считать нормально распределенными с постоянной спектральной плотностью в полосе пропускания измерительного канала.

4. Непрерывные тональные помехи $B_{nc}(t)$, основной вклад в которые вносит промышленная сеть частотой 50 Гц и ее гармонические составляющие.

5. Импульсные помехи $B_{ин}(t)$ различного вида, например сигналы от грозовых разрядов.

Индукционный датчик преобразует переменное магнитное поле, наблюдаемое в точке приема

$B(t) = B_{np}(t) + B_{cn}(t) + B_{ин}(t) + B_{nc}(t) + B_{ин}(t)$ в электрический сигнал $U_2(t)$ (рисунок 1, точка 2).

При работе с шумоподобными зондирующими сигналами необходимо, чтобы выходной сигнал индукционного датчика был пропорционален магнитному потоку, наблюдаемому в точке приема. Согласно закону Фарадея, электродвижущая сила (э.д.с.), индуцируемая в измерительной катушке датчика, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, поэтому для получения сигнала, пропорционального потоку магнитной индукции, измеряется не э.д.с., а ток, создаваемый этой э.д.с. в короткозамкнутой катушке [4]. Поскольку реальные катушки индуктивности, используемые в качестве датчиков переменного магнитного поля, обладают потерями в активном сопротивлении провода, потерями в сердечнике на перемагничивание и паразитной межвитковой емкостью и емкостью между витками и сердечником, то невозможно выполнить интегрирование э.д.с. индуцированную в катушке в широком частотном диапазоне. Только в полосе пропускания датчика можно считать, что ток, протекающий в короткозамкнутой катушке под действием индуцированной в ней э.д.с., будет пропорционален интегралу от нее. Таким образом, в полосе пропускания датчика его импульсная переходная характеристика определится как $g_{ид}(t) = 1(t)$, где $1(t)$ – функция Хевисайда (единичный скачок). Так как площадь витков катушки индукционного датчика значительно меньше площади зондирующей рамки, то поле в точке приема можно считать однородным. Поэтому выражение для сигнала (напряжения) на выходе индукционного датчика запишется как

$$U_2(t) = K_{ид} \times \int [B(t) \otimes g_{ид}(t)] ds = K_{ид} \times S_э \times B(t),$$

где $K_{ид}$ – коэффициент преобразования датчика в полосе пропускания; $S_э$ – эффективная площадь катушки индукционного датчика, зависящая от геометрических размеров катушки, количества витков и магнитной проницаемости сердечника.

Имитатором сигналов на выходе OUT SR моделируется сигнал $U_2(t)$, подаваемый на вход БУФС (точка 2, рисунок 1) для проверки работоспособности и контроля параметров измерительного канала ЭРК ШПС. При этом обеспечивается возможность исследования характеристик передачи отдельных составляющих этого сигнала (прямое поле, сигнал становления поля, шумы и помехи) через измерительный тракт.

В точку 3 подается модель сигнала $U_3(t) = K_{БУФС} \times U_2(t)$, генерируемого на выходе имитатора OUT SR и отличающегося от модели $U_2(t)$ постоянным коэффициентом $K_{БУФС}$, представляющим собой коэффициент усиления БУФС в полосе пропускания.

Сигнал с выхода OUT SS имитатора моделирует форму тока в зондирующей рамке:

$$U_1(t) = K_{дт} \times I_3(t),$$

где $U_1(t)$ – сигнал с выхода ГЗС, пропорциональный току в зондирующей рамке; $K_{дт}$ – коэффициент преобразования датчика тока, входящего в состав ГЗС; $I_3(t)$ – ток в зондирующей рамке.

В лабораторных экспериментах с имитатором модель сигнала $U_1(t)$ подается непосредственно на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП в блоке БУРС (точка 1, рисунок 1).

С помощью сигналов, подаваемых на вход имитатора от внешнего генератора сигналов Ext Gen (рисунок 1), моделируются аддитивные тональные, импульсные и другие виды искусственных и естественных помех, наблюдаемые в реальных зарегистрированных сигналах. В качестве таких генераторов могут быть использованы самые различные источники сигналов, в том числе выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью измерительные генераторы с гарантированными (паспортными) характеристиками выходных сигналов.

Рассмотрим работу имитатора сигналов, структурно-функциональная схема которого показана на рисунке 2.

На выходе генератора шума (ГШ) под управлением сигналов С1 и С2, генерируемых в схеме управления (СУ ГШ), формируется сигнал в виде белого шума с равномерным спектром в широкой полосе частот, нормальным Гауссовским законом распределения амплитуд, нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией. Такой сигнал в первом приближении моделирует естественные магнитотеллурические помехи, регистрируемые в точке приема индукционным датчиком электрозведочного комплекса, а также собственные шумы измерительного канала. Ширина спектра шумового сигнала ограничена полосой пропускания измерительного тракта (0,1 ÷ 25000) Гц. Для точной настройки и контроля параметров генерируемого шума предусмотрены внешние управляющие команды (сигналы) N+, N– и OFF (N), подаваемые на вход СУ ГШ. На выходе ГШ с помощью команд N+ и N– обеспечивается установка постоянного уровня сигнала, соответствующего амплитуде шума для положительных и отрицательных значений. По команде OFF (N) осуществляется отключение шумового сигнала.

Формирователи ФПХС и ФСПП предназначены для моделирования сигнала становления поля SR(t), т. е. зондирующего сигнала, прошедшего через объект исследования (земную кору), и сигнала прямого поля SDF(t), поступающего на вход датчика через воздух, которые суммируются на входе

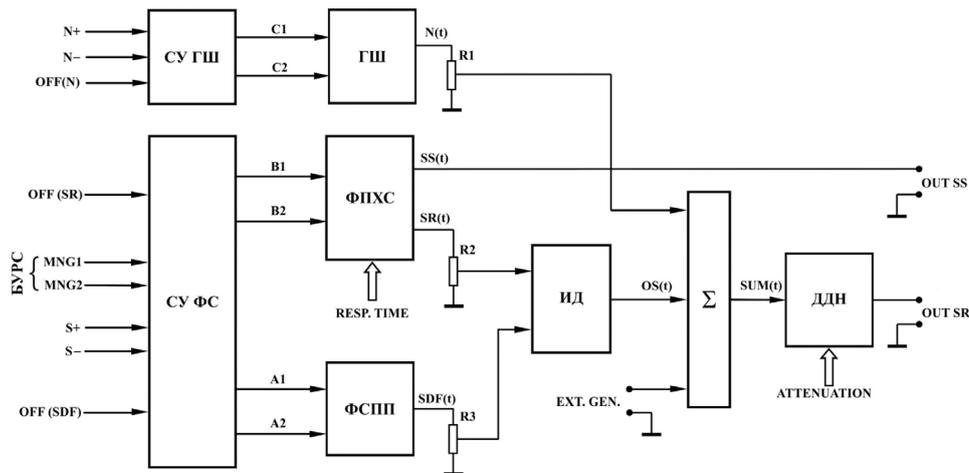


Рисунок 2 – Имитатор сигналов для ЭРК ШПС, схема структурно-функциональная: ГШ – генератор шума; СУ ГШ – схема управления ГШ; СУ ФС – схема управления формирователями сигналов; ФПХС – формирователь переходной характеристики среды; ФСПП – формирователь сигнала прямого поля; ИД – имитатор датчика; Σ – сумматор; ДДН – декадный делитель напряжения

датчика. Управление работой формирователей осуществляет схема СУ ФС. Поступающие от блока управления и регистрации (БУРС) измерительного комплекса сигналы MNG1 и MNG2 преобразуются в две пары логических сигналов A1, A2 и B1, B2, под управлением которых обеспечивается генерация шумоподобных сигналов. Как и в случае СУ ГШ, сигналы управления S+, S-, OFF (SR) и OFF (SDF) являются технологическими и предназначены для настройки параметров генерируемых сигналов (амплитуда и среднее значение) в процессе изготовления и проведения контрольных проверок. По командам OFF (SR) и OFF (SDF) осуществляется независимое отключение (обнуление) сигналов SR(t) и SDF (t). С помощью команд S+ и S- обеспечивается установка положительных и отрицательных значений амплитуд сигналов на выходе формирователей.

Дополнительно в блоке ФПХС формируется сигнал OUT SS, являющийся выходным сигналом имитатора, и представляющим собой модель импульсов тока в зондирующей рамке. Этот сигнал используется в качестве опорного (базового) при лабораторных проверках аппаратуры измерительного комплекса ЭРК ШПС.

Имитатор датчика (ИД, рисунок 2) обеспечивает моделирование переходной характеристика датчика (ИДС, рисунок 1). В качестве модели индукционного датчика в имитаторе используется дифференцирующее инерционное звено первого порядка с заданной постоянной времени, переходная характеристика которого описывается выражением:

$$h_{ИД}(t) = e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $h_{ИД}(t)$ – переходная характеристика датчика, представляющая собой реакцию датчика на входное воздействие в виде единичного скачка $1(t)$ – функция Хевисайда; τ – постоянная времени моделирующего звена.

Сигнал на выходе имитатора датчика $OS(t)$ представляет собой свертку суммы двух сигналов $SR(t)$ и $SDF(t)$ с импульсной переходной характеристикой имитатора датчика

$$g_{ИД}(t) = \frac{d[h_{ИД}(t)]}{dt} = -\frac{1}{\tau} \times e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$OS(t) = [A1 \times SR(t) + A2 \times SDF(t)] \otimes g_{ИД}(t),$$

где $A1$ и $A2$ – масштабные коэффициенты, определяющие соотношение между суммируемыми сигналами.

Потенциометры R1÷R3 осуществляют независимую и плавную регулировку уровней шума $N(t)$, сигнала прямого поля $SDF(t)$ и сигнала становления поля $SR(t)$. Фактически потенциометры R2, R3 задают указанные выше масштабные коэффициенты суммирования сигналов A1 и A2. Потенциометр R1 определяет масштабный коэффициент суммирования шума $N(t)$.

Сигналы $N(t)$ и $OS(t)$ поступают на два входа сумматора (Σ), на третий вход которого подаются сигналы от внешних генераторов (EXT.GEN.), имитирующих помехи различного рода (импульсы, тональные помехи и др.).

Выходной сигнал сумматора $SUM(t)$ поступает на вход декадного делителя напряжения (ДДН),

Таблица 1 – Технические характеристики имитатора сигналов для ЭРК ШПС

Параметр	Ед. изм.	Значение	Примечание
Уровень выходного сигнала	В	$\pm 3,0$	При сопротивлении нагрузки 100 Ом
Коэффициент передачи ДДН	–	$(1,0; 0,1; 0,01; 0,001) \pm 1,0 \%$	
Смещение нуля, не более	мВ	$\pm 1,0$	
Уровень собственных шумов, не более	мкВ	5,0	В полосе частот 0,1 ÷ 25000 Гц
Спектральная полоса шумового сигнала	Гц	0,1 ÷ 25000	
Диапазон регулировки постоянной времени переходной характеристики модели среды	мкс	$(20-160) \pm 2\%$	Дискретно с шагом $(6 \pm 2,0 \%)$ дБ
Длительность фронта (среза) модели зондирующего сигнала, не более	мкс	1,0	
Напряжение источника питания	В	190 ÷ 240	Сеть 220 В 50 Гц
Потребляемая мощность, не более	Вт	20	

осуществляющего ступенчатую регулировку уровня сигнала на выходе OUT SR имитатора с шагом 20 дБ в диапазоне 0 ÷ 60 дБ. Плавная регулировка уровней отдельных составляющих выходных сигналов с помощью потенциометров совместно со ступенчатым переключением уровня суммарного сигнала, осуществляемого в ДДН, обеспечивают необходимый динамический диапазон перестройки выходного уровня моделируемого сигнала.

В таблице 1 приведены технические характеристики имитатора сигналов, полученные в ходе лабораторных испытаний совместно с электроразведочным измерительным комплексом ЭРК ШПС.

Таким образом, разработанный специализированный имитатор сигналов для измерительного комплекса ЭРК ШПС позволяет генерировать модельные сигналы в различных точках измерительного комплекса при проведении исследовательских работ, а также проводить проверку работоспособности и контроль технических характеристик электроразведочного комплекса в лабораторных условиях.

Испытания имитатора сигналов на соответствие заданным техническим требованиям и первые совместные эксперименты с измерительным комплексом ЭРК ШПС показали важность и необходимость проведенных исследований.

Литература

1. Устройство тестирования TDEM – TEST. URL: <http://tsiklgeo.ru/9-sredstva/25-ustroystvo-testirovaniya-tdem-test> (дата обращения 22.05.2015).
2. Ильичев П.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С. 5–19.
3. Ильичев П.В. Отчет по НИР “Разработка аппаратно-программных средств и основ технологий электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей” / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский, Д.С. Мясников, О.А. Лашин, Е.Ю. Копылов // ИС РАН, 2014. Гос. рег. № 0120.0713073. С. 65–72.
4. Ильичев П.В. Отчет по НИР “Разработка аппаратно-программных средств и основ технологий электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей” / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский, Д.С. Мясников, О.А. Лашин, Е.А. Плисовицкая // ИС РАН, 2012. Гос. рег. № 0120.0713073. С. 10–15.