

УДК 550.380.83 / 621.317.328

## ВАРИАЦИИ УРОВНЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ КАК КОНТРОЛИРУЕМЫЙ ПАРАМЕТР ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

*П.В. Ильичев, В.В. Бобровский*

С помощью математического моделирования работы геоэлектроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами выявлена линейная связь амплитуды импульсов «структурных помех», возникающих при корреляционной обработке регистрируемых измерительным комплексом сигналов становления поля с нелинейностью передаточных характеристик узлов и блоков измерительной системы, включая объект исследования – земную кору. Доказана возможность измерения малых вариаций нелинейных искажений, вносимых земной корой в регистрируемые сигналы при значительных, но стабильных (не изменяющихся во времени и под действием внешних факторов) параметрах нелинейности передаточных характеристик измерительной аппаратуры. Предложено использовать получаемые вариации нелинейных искажений, вносимых земной корой, в качестве контролируемого параметра в системах электромагнитного мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры.

*Ключевые слова:* шумоподобные сигналы; геоэлектроразведка; корреляционная обработка сигналов; «структурные помехи».

---

## ЖЕР КЫРТЫШЫНДАГЫ ЭЛЕКТР СИГНАЛДАРЫНЫН СЫЗЫКТУУ ЭМЕС БУЗУЛУУЛАРЫНЫН ДЕНГЭЭЛИНИН ВАРИАЦИЯСЫ ГЕОФИЗИКАЛЫК МОНИТОРИНГДИН КӨЗӨМӨЛДӨӨЧҮ ПАРАМЕТРИ КАТАРЫ

Добуш сыяктуу текшерүүчү сигналдары бар геологиялык-электрдик чалгындоочу ченөөчү комплекстин ишин математикалык моделдөөнүн жардамы менен ченөөчү комплексте катталган талаанын калыптануу сигналдарын корреляциялык иштеп чыгууда келип чыккан «структуралык тоскоолдуктар» импульстарынын амплитудасы менен ченөөчү блоктун түйүндөрүнүн жана блокторунун, анын ичинде изилдөөнүн объектиси – жер кыртышынын өткөргүч мүнөздөмөсүнүн сызыктык эместиги менен сызыктык байланышы аныкталды. Ченөөчү аппаратуранын өткөргүч мүнөздөмөсүнүн олуттуу, бирок туруктуу (убакыттын өтүшү жана тышкы факторлордун таасири менен өзгөрбөгөн) сызыктуу эмес параметрлеринде катталган сигналдарга жер кыртышы тарабынан киргизилген сызыктуу эмес бузулуулардын кичи вариацияларынын өзгөрүү мүмкүнчүлүгү далилденди. Жер кыртышы тарабынан киргизилген сызыктуу эмес бузулуулардын вариацияларын жер кыртышынын чыңалып, деформацияланган абалына элетромагниттик мониторинг жүргүзүү системаларында көзөмөлдөөчү параметр катары пайдаланса болот.

*Түйүндүү сөздөр:* добуш сыяктуу сигналдар; геологиялык-электрдик чалгындоо; сигналдарды корреляциялык иштеп чыгуу; «структуралык тоскоолдуктар».

---

## NONLINEAR DISTORTIONS LEVEL VARIATIONS OF ELECTRICAL SIGNALS IN THE EARTH CRUST AS CONTROLLED GEOPHYSICAL MONITORING PARAMETER

*P.V. Ilichev, V.V. Bobrovsky*

By means of mathematical modeling of work of the geoelectroprospecting measuring complex with the noise probing signals linear communication of amplitude of impulses of the «structural interference» arising at correlation processing of the signals of formation of the field registered by a measuring complex with nonlinearity of transfer characteristics of knots and blocks of a measuring system including a research object – crust is revealed. The possibility of measurement of small variations of the nonlinear distortions brought by crust in the registered signals at considerable, but stable (not changing in time and under the influence of external factors) parameters of nonlinearity of transfer characteristics of the measuring equipment is proved. It is offered to use the received variations of the nonlinear distortions brought by crust as controlled parameter in the systems of electromagnetic monitoring of the intense deformed condition of crust.

*Keywords:* pseudo noise signal; geoelectric exploration; correlation signal processing; «structural interference».

В Научной станции РАН в г. Бишкеке проводятся работы по модернизации действующей системы электромагнитного мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры, целью которых является расширение функциональных возможностей проводимых исследований и повышение точности и надежности аппаратных измерений. Поставленную цель планируется достичь за счет включения в состав действующего оборудования измерительных пунктов системы геомониторинга новых современных, разработанных в НС РАН электроразведочных измерительных комплексов, обеспечивающих электромагнитное зондирование земной коры методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ) с применением специальных шумоподобных зондирующих сигналов (ШПС).

Разработан и изготовлен макетный образец электроразведочного измерительного комплекса с применением шумоподобных сигналов (ЭРК ШПС), предназначенный для проведения экспериментальных работ в лабораторных и полевых условиях. Первые эксперименты, выполненные на изготовленном макете, подтвердили теоретические предпосылки по значительному улучшению выходного соотношения сигнал/шум по сравнению с традиционными электроразведочными системами [1].

В процессе экспериментальных работ с макетным образцом ЭРК ШПС были выявлены важные особенности, связанные с применением ШПС в электроразведочной аппаратуре. В процессе корреляционной обработки зарегистрированных измерительным комплексом сигналов, как в полевых, так и в лабораторных условиях, на фоне получаемой кривой становления поля были обнаружены импульсные сигналы, которым было дано название «структурные помехи», так как их форма и временное положение связаны с параметрами и структурой зондирующих и принимаемых сигналов. «Структурные помехи» представляют собой импульсы различной амплитуды с экспоненциальной формой фронтов нарастания и спада (рисунок 1, а), расположенные на кривой становления поля в точках, кратных минимальной длительности импульсов в зондирующей М-последовательности.

Амплитуды импульсов «структурных помех» распределены вдоль кривой становления поля не равномерно. График плотности распределения вероятности «структурных помех», представленный на рисунке 1, г) свидетельствует о том, что наиболее вероятными являются амплитуды помех, сосредоточенные в очень узкой области. Как правило, на кривой становления поля присутствует только

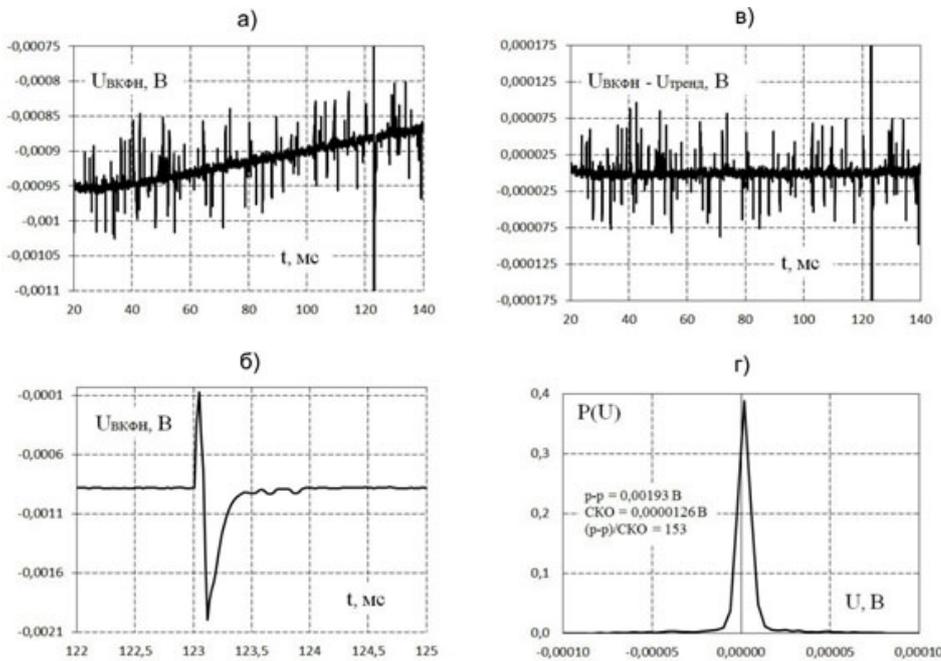


Рисунок 1 – «Структурные помехи» на фоне сигналов становления поля  $U_{\text{вкфн}}$ :

а – фрагмент кривой становления поля с импульсами «структурных помех» (масштаб по вертикали 1:1000);

б – форма импульса «структурной помехи» максимальной амплитуды;

в – фрагмент кривой становления поля с удаленными трендами (медленными составляющими);

г – график плотности распределения вероятности «структурных помех»

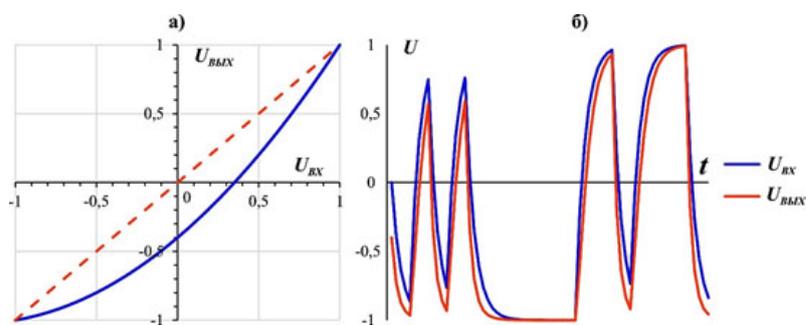


Рисунок 2 – Пример влияния передаточной характеристики нелинейного звена, описываемого асимметричной степенной функцией на искажения формы проходящих через него сигналов:  
 а – график передаточной характеристика нелинейного звена;  
 б – сигналы на входе ( $U_{ВХ}$ ) и выходе ( $U_{ВЫХ}$ ) нелинейного звена

один импульс «структурной помехи» с максимальной амплитудой, амплитуды всех остальных импульсов гораздо ниже максимального. Временное расположение импульса с максимальной амплитудой определяется внутренней структурой используемой зондирующей М-последовательности, что обеспечивает возможность перемещения его по оси времени без изменения длительности М-последовательности. Амплитуда максимального импульса «структурной помехи» примерно на три порядка меньше максимума сигнала кривой становления поля. Наличие «структурных помех» может привести к ограничению возможностей используемого метода зондирования земной коры по подавлению широкополосных шумов. Снижение уровня «структурных помех» невозможно традиционными способами такими как частотная фильтрация и синхронное накопление сигналов во временном окне так как спектр этих импульсов совпадает со спектром сигнала становления поля и эти помехи жестко синхронизированы по времени фронтами импульсов зондирующей последовательности.

Для определения причин (источников) «структурных помех» с помощью математического моделирования были проведены исследования, показавшие, что основной причиной их появления является нелинейность передаточных характеристик устройств и блоков измерительной системы. В математическую модель измерительного комплекса было введено нелинейное звено (устройство (блок), для которого передаточная характеристика, представляющая зависимость выходного сигнала от входного, является функцией, отличной от линейной (степенная, логарифмическая, синусоидальная и другие функциональные зависимости). Для моделирования передаточных характеристик использовали аналитические зависимости, близкие по форме к нелинейностям, которыми

обладают реальные аналоговые схемы усилительных устройств и аналого-цифровых преобразователей регистрационного тракта измерительного комплекса. В качестве количественной оценки передаточной характеристики нелинейного звена рассматривали максимальное отклонение его передаточной характеристики от идеальной прямой линии ( $\Delta NL$ ). Аналогичный параметр применяется при определении ошибки интегральной нелинейности АЦП ( $INL$ ) [2]. На рисунке 2 приведен пример передаточной характеристики нелинейного звена и искажения сигналов, прошедших через такое звено.

Проведенные исследования показали, что присутствие любых статических нелинейностей в измерительном тракте приводит к появлению в выходном сигнале измерительной системы «структурных помех», при этом вариации параметра  $\Delta NL$  приводят к пропорциональному изменению амплитуды «структурных помех». Кроме того, амплитуды импульсов «структурных помех» прямо-пропорциональны амплитуде зондирующего сигнала, а форма импульсов «структурных помех» повторяет импульсную переходную характеристику измерительного тракта, включающего зондирующую индукционную рамку (магнитный диполь), объект исследования (земную кору), приемный измерительный индукционный датчик, блоки усиления и фильтрации сигналов и аналого-цифровой преобразователь. Чем короче переходный процесс в измерительном тракте, тем меньше амплитуда «структурных помех». Выявлено, что уровень «структурных помех» зависит не только от параметра нелинейности  $\Delta NL$ , но и от формы передаточной характеристики нелинейного звена.

Земная кора, обладая сложно организованной структурой, с точки зрения протекающих в ней электромагнитных процессов (возбуждение

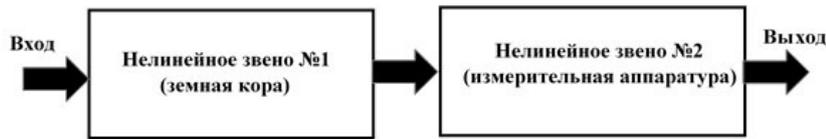


Рисунок 3 – Структура нелинейной модели измерительной системы

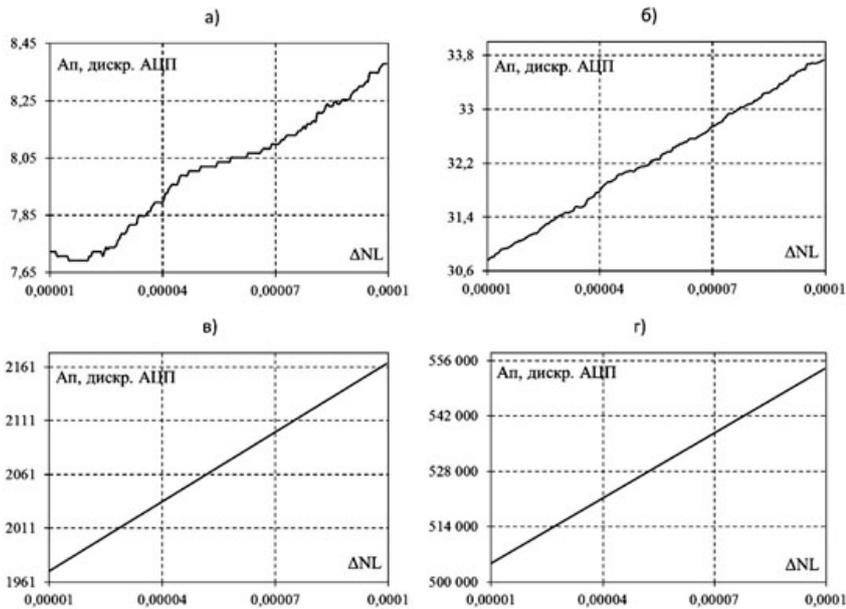


Рисунок 4 – Графики зависимости амплитуды «структурных помех» (Ап), наблюдаемых на фоне кривой становления поля, от параметра нелинейности ( $\Delta NL$ ) исследуемого объекта (земной коры) при использовании 16-разрядного (а), 20-разрядного (б), 24-разрядного (в) и 32-разрядного (г) АЦП

и протекание электрического тока) не всегда может быть представлена как линейная система. В земной коре, особенно на границах ее структурных блоков, различающихся по электрическим параметрам, вполне возможно появление структурных элементов по электрическим свойствам и параметрам очень похожих на полупроводниковые p-n-переходы, которые, являясь с электрической точки зрения сугубо нелинейными объектами, могут существенно влиять на линейность электрических передаточных характеристик земной коры.

В результате проведенного математического моделирования измерительной системы с шумоподобными сигналами и различными типами нелинейных элементов, появилась идея измерения и отслеживания уровня нелинейных искажений, вносимых объектом исследования – земной корой, в регистрируемые сигналы на приемной стороне измерительной системы. Если земная кора обладает нелинейными электрическими свойствами, то

эти нелинейности должны быть связаны с напряженно-деформированным состоянием слагающих ее горных пород и с ее сложно организованной иерархической «диссипативной» структурой [3], изменения которой отражают происходящие в ней динамические процессы.

Для проверки реализуемости этой идеи проводили математическое моделирование измерительной системы с учетом влияния нелинейностей, создаваемых объектом исследования – земной корой и измерительной аппаратурой одновременно. Измеряемый модельный сигнал отклика среды последовательно пропускали через два нелинейных звена (рисунок 3).

Во втором звене, моделирующем нелинейность измерительной аппаратуры, параметр нелинейности  $\Delta NL$  устанавливался фиксированным равным 0,01, что составляет 1 % от полной шкалы измерительного канала. В первом звене, моделирующем нелинейность земной коры, параметр

нелинейности изменялся в диапазоне от 0,0001 (0,01 %) до 0,00001 (0,001 %). Далее выполнялась дискретизация регистрируемого на выходе сигнала при помощи шестнадцати, двадцати, двадцати четырех и тридцати двух разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). После чего выполнялась корреляционная обработка выходного сигнала с зондирующим и вычислялась амплитуда максимального импульса «структурных помех», наблюдаемых на фоне получаемой кривой становления поля. В результате были построены графики зависимости амплитуды «структурной помехи» ( $A_p$ ) от параметра нелинейности  $\Delta NL$ . Согласно полученным графикам (рисунок 4) можно сделать вывод, что в случае применения АЦП с разрядностью 20 и выше зависимость  $A_p$  от параметра нелинейности объекта исследования (земной коры)  $\Delta NL$  приближается к линейной.

Таким образом, проведенные исследования показали, что возможно измерение очень малых вариаций нелинейности исследуемого объекта (земной коры) даже при больших (на два порядка выше) уровнях нелинейности аппаратуры измерительного канала.

Результаты проведенных исследований принципиально доказывают возможность выделения малых вариаций нелинейности исследуемого

объекта (земной коры) на фоне сравнительно высокой нелинейности измерительной аппаратуры.

Для наблюдения за вариациями нелинейных свойств земной коры как части измерительной системы и использования их в качестве контролируемого параметра при проведении электромагнитного мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры необходимо, чтобы другие части этой системы (зондирующая установка и приемный измерительный тракт) обладали стабильными во времени и не изменяющимися под действием внешних факторов передаточными характеристиками.

#### *Литература*

1. *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.
2. Аналого-цифровое преобразование / ред. ориг. издания Analog Devices Уолт Кестер; пер. с англ. под ред. Е.Б. Володина. М.: Техносфера, 2007. С. 85–88.
3. *Родионов В.Н.* Основы геомеханики / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, В.М. Цветков. М.: Недра, 1986.