

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ (ПРИЧИН) «СТРУКТУРНЫХ ПОМЕХ» В ГЕОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ АППАРАТУРЕ С ШУМОПОДОБНЫМИ ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ

Бобровский В.В., Ильичев П.В.

bvlad77@mail.ru, pavel.v1953@mail.ru

Научная станция Российской академии наук, г. Бишкек, Киргизия

Исследовались причины возникновения «структурных помех», обнаруженных в процессе корреляционной обработки шумоподобных сигналов, регистрируемых разработанным в НС РАН электроразведочным измерительным комплексом. Определены основные источники их возникновения. Выявлена функциональная связь «структурных помех» с уровнем регистрируемых сигналов и нелинейными искажениями их в измерительном тракте.

Ключевые слова: шумоподобные сигналы, корреляционная обработка сигналов, «структурные помехи».

В 2014 году в НС РАН были проведены первые лабораторные и полевые эксперименты на изготовленном макетном образце электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС) [1]. При проведении экспериментальных работ, на фоне получаемой кривой становления поля были обнаружены «странные» импульсные сигналы различной амплитуды экспоненциальной формы, получившие название «структурные помехи» (рис. 1).

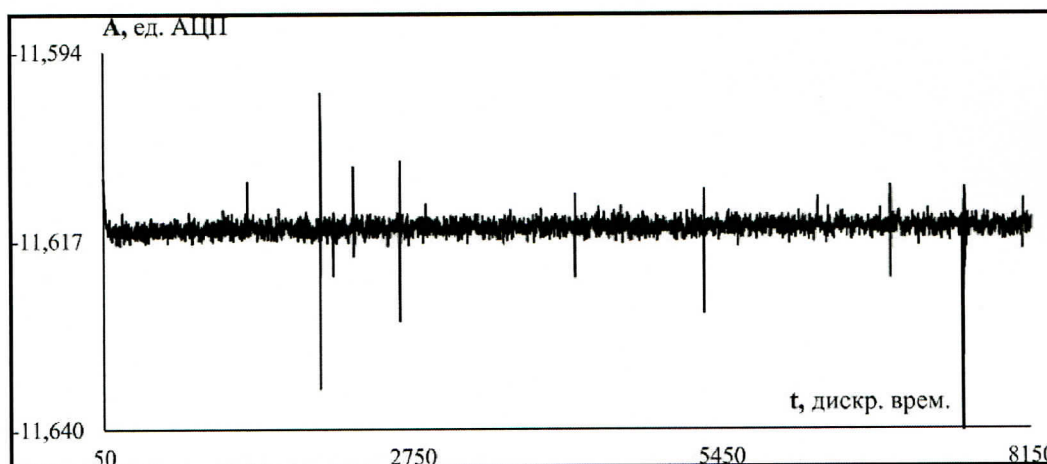


Рисунок 1 - Пример «структурных помех», наблюдаемых на фоне кривой становления поля

Отличительной особенностью этих сигналов является то, что их амплитуда не зависит от числа накоплений периодически повторяемых взаимно корреляционных функций (ВКФ), получаемых в результате корреляционной обработки зарегистрированных сигналов. Природа этих помех связана со структурой регистрируемых сигналов, отсюда их название.

В 2015 году экспериментальные работы с ЭРК ШПС были продолжены с применением специально разработанного и изготовленного имитатора сигналов. Проведение этих экспериментов было направлено на поиск и выявление причин возникновения «структурных помех». Лабораторные эксперименты позволили определить типы некоторых источников «структурных помех». Количественно исследовать их влияние не удалось из-за того, что схемы имитатора сигналов, формирующие модельные сигналы, сами могут быть

источниками таких помех. Исключить полностью этот фактор не представляется возможным. По этой же причине невозможно физически смоделировать только один источник «структурных помех», а влияние других полностью исключить. Для подтверждения результатов лабораторных экспериментов и получения количественных оценок раздельного влияния различных источников «структурных помех» потребовалась дополнительная разработка и программирование математических моделей таких источников с включением их в ранее разработанную программу математического моделирования работы измерительного комплекса.

В 2015 – 2016 годах с помощью разработанной усовершенствованной математической модели ЭРК ШПС были проведены исследования предполагаемых источников «структурных помех». Основные задачи, которые решались при этом:

- 1) построение упрощенных математических моделей предполагаемых физических источников «структурных помех»;
- 2) исследование свойств «структурной помехи» при изменении параметров модели источника;
- 3) оценка степени влияния каждого из источников на параметры структурной помехи;
- 4) изучение возможности устранения либо уменьшения влияния каждого из источников структурной помехи.

Модель среды. Для исследований была принята математическая модель среды в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка с фиксированным коэффициентом передачи и постоянной времени. Переходная характеристика такой модели (отклик на входное воздействие в виде единичного скачка $1(t)$ – функции Хевисайда) запишется как:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{cp}}}, \quad (1)$$

где τ_{cp} - постоянная времени модели среды (интегрирующего инерционного звена).

Тогда выражение для отклика среды на воздействие в виде биполярной шумоподобной М-последовательности можно записать в виде:

$$U_{oc_i}(t) = U_{Ci} + [(-1)^i \cdot A_{шпс} - U_{Ci}] \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{cp}}}), \quad (2)$$

где: $A_{шпс}$ – амплитуда импульсов в зондирующей М-последовательности; i – порядковый номер импульса в зондирующей последовательности; U_{Ci} – уровень сигнала на выходе интегрирующего инерционного звена в момент начала импульса с номером i ; $0 < t \leq (t_{i+1} - t_i)$ – текущее время, отсчитываемое внутри интервала от t_i до t_{i+1} ; t_i – время начала импульса с номером i в последовательности зондирующих импульсов; t_{i+1} – время начала импульса с номером $i+1$ (конец импульса с номером i); τ_{cp} - постоянная времени модели среды (интегрирующего инерционного звена).

На рис.2 - представлены временные диаграммы зондирующей последовательности импульсов и отклика среды на зондирующее сигналы, полученного согласно (2).

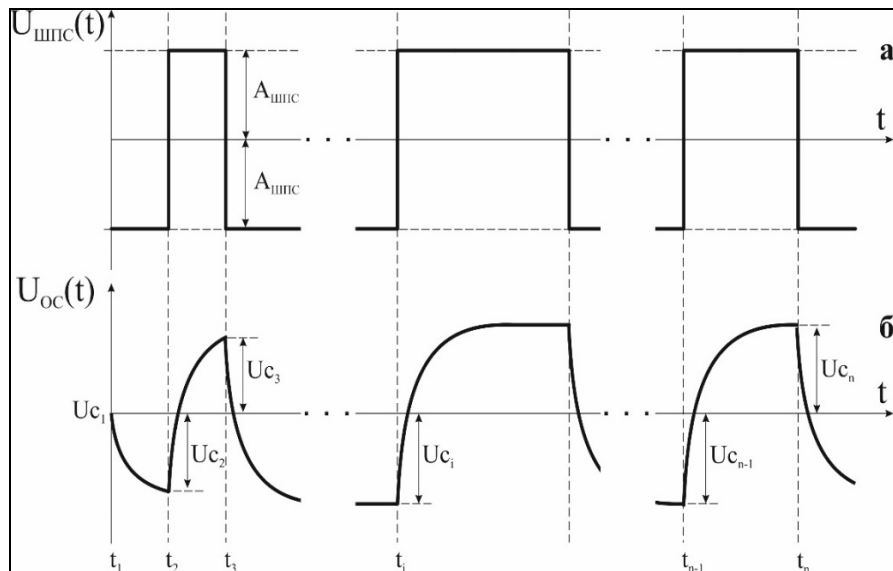


Рисунок 2 – Временные диаграммы: а) - зондирующей последовательности импульсов; б) - модели отклика среды на зондирующую последовательность.

$A_{шпс}$ – амплитуда импульсов в M -последовательности; t_i – время начала i -го импульса в зондирующей последовательности; $i = [1, 2, \dots n]$ – порядковый номер импульса в зондирующей последовательности импульсов; n -число импульсов в зондирующей последовательности; U_{c_i} – уровень сигнала (напряжения) на выходе интегрирующего инерционного звена к моменту начала i -го импульса

На математических моделях были рассмотрены следующие предполагаемые физические источники «структурных помех»:

- 1) процесс преобразования (дискретизации) сигналов аналого-цифровым преобразователем (АЦП),
- 2) динамическая погрешность, возникающая при работе АЦП,
- 3) нелинейность характеристик передачи и преобразования сигналов в измерительной системе,
- 4) «пролезающие» через паразитные цепи сигналы от цифровых узлов измерительного комплекса.

Оценка влияния параметров и характеристик источника «структурных помех» на их величину (уровень) производилась через вычисление соотношения сигнал/помеха на выходе процедуры корреляционной обработки сигналов. Под соотношением сигнал/помеха здесь и далее понимается отношение амплитуды максимального значения взаимной корреляционной функции (A_c) между зондирующей M -последовательностью и моделью отклика среды на эту последовательность к величине размаха (от пика до пика) структурной помехи (A_n). Соотношение сигнал/помеха вычисляется в децибелах по формуле:

$$A_c / A_n, \text{дБ} = 20 \lg \left(\frac{A_c}{A_n} \right) \quad (3)$$

Дискретизация сигналов как источник «структурных помех». Для изучения влияния процесса дискретизации сигналов в АЦП на появление «структурных помех» была разработана математическая модель, полностью имитирующая процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой код в аналого-цифровом преобразователе.

Исследования показали, что процесс дискретизации сигналов по существу представляет собой нелинейное преобразование (модуляция) сигналов и приводит к появлению «структурных помех». Уровень возникающих при этом «структурных помех» стабилен и зависит лишь от разрядности применяемого АЦП. Численно уровень (амплитуда) «структурных помех», вызванных дискретизацией сигнала примерно на порядок меньше веса

младшего разряда (дискреты) АЦП. Снижение уровня этих помех достигается увеличением разрядности АЦП, используемого в измерительном канале. На рис. 3 - показаны временные диаграммы «структурных помех» (шумов квантования), вызываемых дискретизацией сигналов для разных разрядностей АЦП.

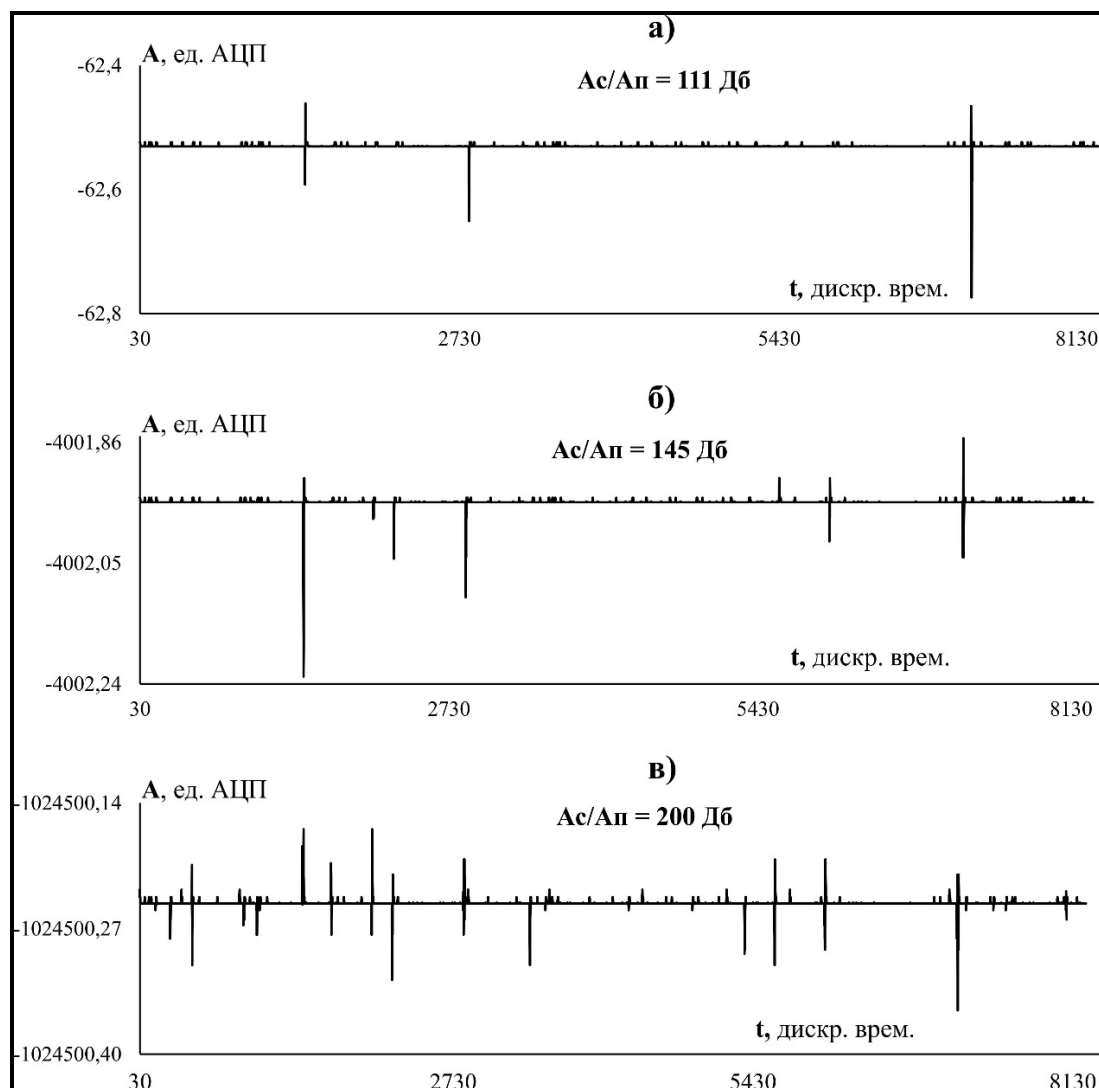


Рисунок 3 – Уровень шумов, в зависимости от разрядности квантования АЦП а) 16 разрядов, б) 24 разряда, в) 32 разряда

Динамическая погрешность АЦП как источник «структурных помех». Для исследования динамической погрешности АЦП в качестве причины появления «структурных помех» была разработана математическая модель устройства выборки и хранения (УВХ), входящего в состав АЦП. За основу была принята схема УВХ, встроенная в микросхему AD676, используемая в качестве АЦП в измерительном комплексе ЭРК ШПС. На рис. 4 приведена функциональная схема и временные диаграммы работы модели УВХ.

Параметром УВХ, определяющим погрешность выборки и запоминания входного сигнала, является постоянная времени интегрирующей RC-цепи, вычисляемая как:

$$\tau_{RC} = R \cdot C \quad (4)$$

Переходная характеристика такой цепи определяется выражением:

$$h(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{RC}}}) \quad (5)$$

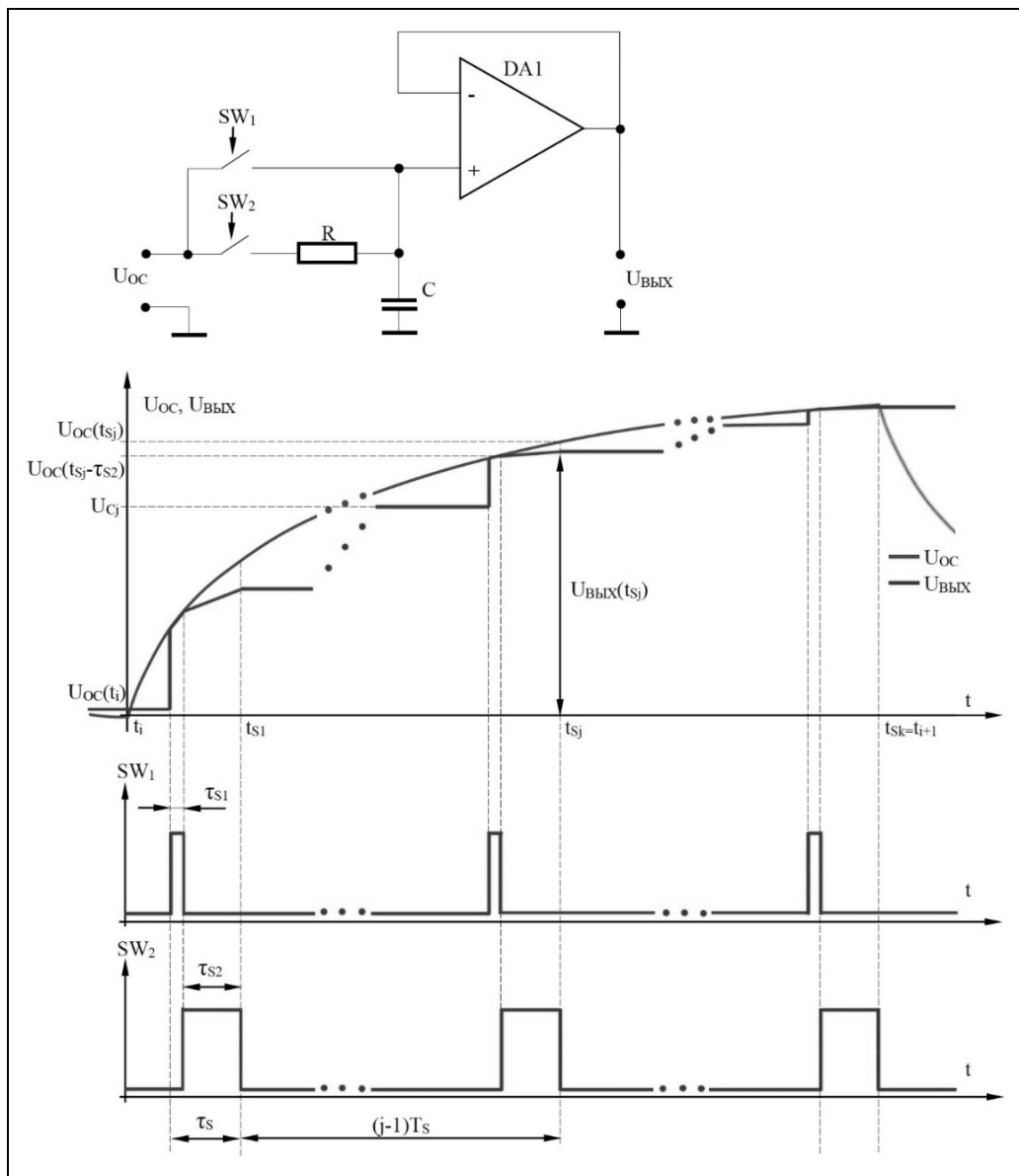


Рисунок 4 – Функциональная схема и временные диаграммы работы модели УВХ

Проследить работу УВХ на временном отрезке, соответствующем длительности одного импульса М-последовательности можно по временной диаграмме работы УВХ представленной на рис. 4. В момент времени t_i , соответствующий началу очередного импульса М-последовательности, на входе схемы УВХ присутствует сигнал $U_{оч}(t_i)$, поступающий с выхода инерционного интегрирующего звена, имитирующего земную кору. При этом напряжение на конденсаторе С сохраняется равным запомненному на предыдущем цикле работы УВХ. В момент начала очередной выборки $t_{sj} - \tau_s$ на короткое время τ_{s1} замыкается ключ SW_1 и напряжение на конденсаторе практически мгновенно начинает отслеживать (повторять) входное $U_{оч}(t)$ и к концу интервала τ_{s1} будет равно $U_{оч}(t_{sj} - \tau_{s2})$. Далее ключ SW_1 размыкается, а ключ SW_2 замыкается на длительность τ_{s2} , при этом напряжение на конденсаторе продолжает отслеживать подаваемое на вход УВХ напряжение, но уже не мгновенно, а со скоростью, определяемой постоянной времени RC-цепи УВХ. В момент времени t_{sj} электронный ключ SW_2 размыкается и УВХ переходит в режим хранения запомненного на конденсаторе напряжения до следующей выборки. Напряжение на конденсаторе С к моменту окончания j-ой выборки (t_{sj}) достигнет значения $U_{вых}(t_{sj})$. Индексом $j = 1, 2, \dots, k$ обозначен порядковый номер выборки в i-том импульсе, k – число выборок в рассматриваемом импульсе.

Напряжение на выходе УВХ к моменту окончания j -ой выборки $U_{\text{ВЫХ}}(t_{sj})$ можно вычислить, воспользовавшись методом, применяемым для анализа переходных процессов в электронных цепях при подаче на их вход воздействия произвольной формы, основанным на использовании переходной характеристики цепи и вычислении интеграла Дюамеля. Если известна функция входного воздействия $U_{\text{ВХ}}(t)$ и переходная характеристика исследуемой цепи $h(t)$ с постоянной времени τ , то реакция этой цепи на входное воздействие может быть получена через интеграл Дюамеля. Так как к моменту начала очередной выборки на выходе УВХ уже имеется напряжение U_C , запомненное на предыдущем цикле работы, необходимо подставить в интеграл Дюамеля начальные условия. С учетом начальных условий сигнал на выходе УВХ можно записать следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_C + (U_{\text{ВХ}}(0) - U_C) \cdot h(t) + \int_0^t \frac{dU_{\text{ВХ}}(\tau)}{d\tau} \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Исследования показали, что динамическая погрешность, вносимая в измеряемый сигнал устройством выборки и хранения, не приводит к появлению «структурных помех». Отсутствие «структурных помех» от работы схемы УВХ можно объяснить тем, что динамические искажения сигналов на выходе УВХ эквивалентны искажениям, характерным для линейных частотно зависимых цепей, которые не могут быть причиной появления «структурных помех».

Нелинейность измерительного тракта как источник «структурных помех». Для моделирования нелинейности измерительного тракта в математическую модель измерительного комплекса ЭРК ШПС было введено нелинейное звено, представляющее собой устройство (блок), для которого зависимость выходного сигнала от входного, представляет собой функцию отличную от линейной (степенная, логарифмическая, синусоидальная и т.д.). Такую зависимость называют передаточной характеристикой нелинейного звена. Предполагаемые и рассматриваемые при проведении экспериментов с ЭРК ШПС характерные для аналоговых схем нелинейности типа «зона нечувствительности», «зона ограничения», а также интегральная нелинейность АЦП относятся к статическим нелинейностям. Такие нелинейности обладают однозначными характеристиками. Однозначность характеристики нелинейного звена означает чувствительность ее только к значениям входной величины (аргументу). При этом выходная величина (функция) не зависит от направления изменения входной (уменьшение или увеличение) и от производных этого изменения (скорости, ускорения и т.д.). Большинство нелинейностей, встречающихся в электронных устройствах в первом приближении можно описать функцией вида [2]:

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = a_1 \cdot U_{\text{ВХ}} + a_n \cdot U_{\text{ВХ}}^n, \quad (7)$$

где: a_1 и a_n - постоянные коэффициенты; n - показатель степени, принимающий только положительные целочисленные значения, начиная с 2. В качестве передаточной характеристики нелинейного звена использовалась степенная функция вида (7), которая может быть симметричной или несимметричной. Такой выбор обоснован возможностью представления передаточной характеристики нелинейного звена в виде простой монотонной аналитически записываемой функции. Симметричные степенные функции в большей степени отражают передаточные характеристики аналоговых каскадов, особенно выходных каскадов усиления сигналов. Передаточная характеристика таких устройств, как правило, имеет зону с пониженной (малой) чувствительностью при малых амплитудах выходных сигналов. Ассиметричные степенные функции лучше подходят для моделирования интегральной нелинейности АЦП. В качестве количественной оценки передаточной характеристики нелинейного звена рассматривалось максимальное отклонение его передаточной характеристики от идеальной прямой линии (ΔNL).

На рис. 5 и рис. 6 приведены результаты моделирования работы нелинейного звена, описываемого симметричной (с показателем $n=3$) и ассиметричной (с показателем $n=2$) степенными функциями. Для наглядной демонстрации искажения формы сигнала после прохождения его через нелинейное звено значение параметра ΔNL было задано на уровне

40% от полной шкалы изменения выходного сигнала $U_{ВЫХ}$.

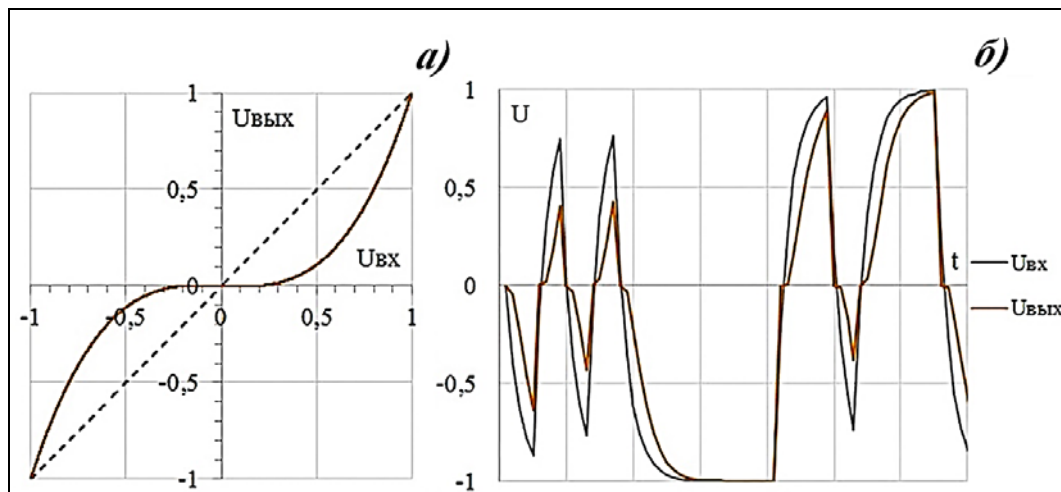


Рисунок 5 – Результаты моделирования работы нелинейного звена, описываемого симметричной степенной функцией с показателем степени $n = 3$: а) график передаточной характеристика нелинейного звена б) графики сигналов на входе ($U_{ВХ}$) и выходе ($U_{ВЫХ}$) нелинейного звена

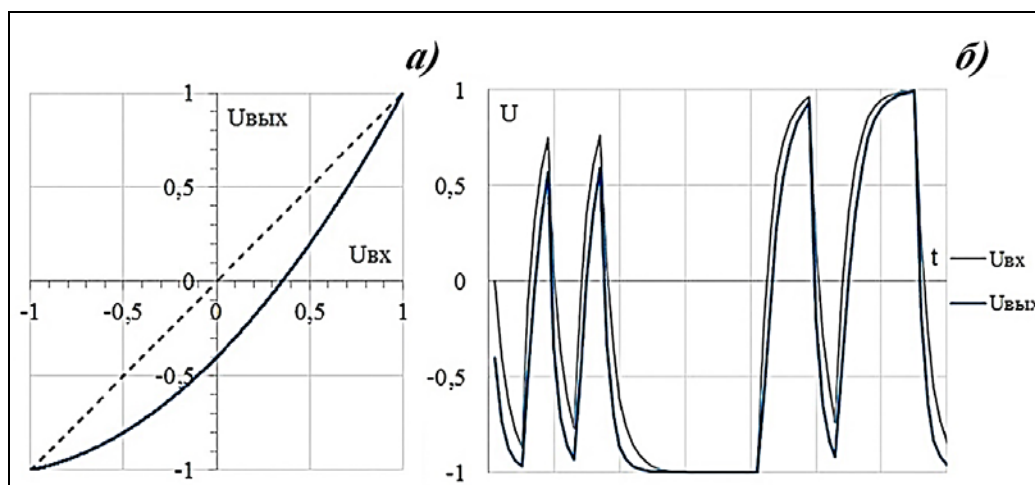


Рисунок 6 – Результаты моделирования работы нелинейного звена, описываемого асимметричной степенной функцией с показателем степени $n = 2$: а) график передаточной характеристика нелинейного звена б) графики сигналов на входе ($U_{ВХ}$) и выходе ($U_{ВЫХ}$) нелинейного звена

Для исследования влияния выше рассмотренных нелинейностей на «структурную помеху» был разработан потоковый алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс вычисления зависимости амплитуды «структурной помехи» ($A_{П}$) от параметра ΔNL .

На рис. 7 а) и 7 б) представлены результаты моделирования зависимости амплитуды «структурной помехи» ($A_{П}$) от параметра ΔNL . Из графиков видно, что при прочих равных условиях, для нелинейного звена с асимметричной передаточной характеристикой уровень «структурных помех» значительно выше уровня таких помех для нелинейного звена с симметричной характеристикой. Это означает, что уровень «структурных помех» зависит не только от параметра нелинейности ΔNL , но и от формы передаточной характеристики нелинейного звена.

Проведенные исследования показали, что любые статические нелинейности в измерительном тракте являются причиной появления «структурных помех». Причем

изменение ΔNL (максимальное отклонение передаточной характеристики нелинейного звена от прямой линии) приводит к пропорциональному изменению амплитуды «структурных помех». Амплитуды всех импульсов «структурных помех» изменяются пропорционально изменению амплитуды зондирующего сигнала, а по форме повторяют форму и длительность переходной характеристики 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». В пределе «структурные помехи» исчезают при полном отсутствии переходного процесса.

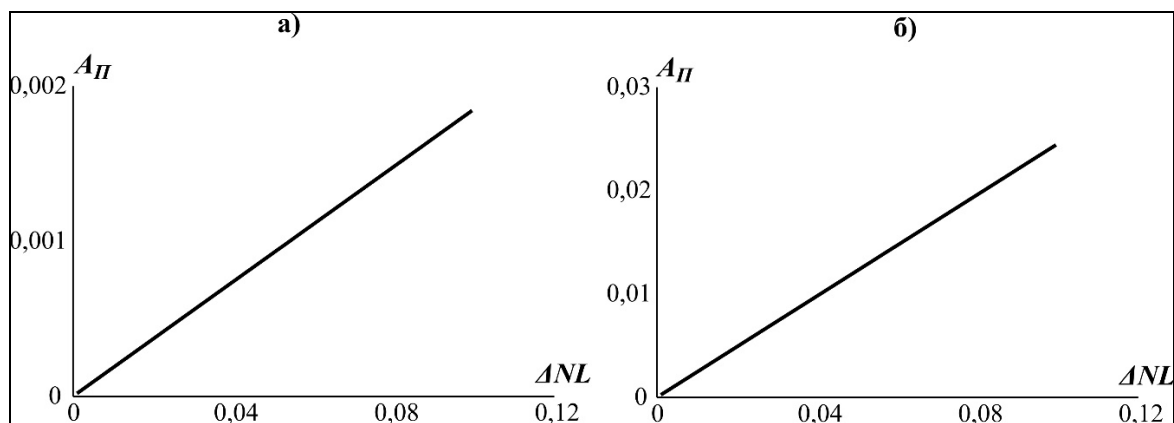


Рисунок 7 – График зависимости амплитуды «структурной помехи» ($A_{П}$) от параметра ΔNL для нелинейного звена с симметричной а) и ассиметричной б) передаточной характеристикой

Пролезающие цифровые сигналы как источник «структурных помех». Для оценки влияния помех, возникающих в измерительном тракте ЭРК ШПС от работы цифровых схем на появляющиеся после корреляционной обработки сигналов «структурные помехи» была разработана модель, представляющая пролезающие цифровые помехи как результат прохождения управляющих цифровых сигналов формирователя М-последовательности через паразитную дифференцирующую RC-цепь. Цифровой сигнал представлен в виде импульсов трапецеидальной формы, имеющих разный по длительности фронт и спад. На рис. 8 приведены временные диаграммы цифрового сигнала и вызываемой им помехи.

Измерительная аппаратура сконструирована таким образом, что моменты выборок сигнала в АЦП находятся за пределами фронта и спада цифрового сигнала. Все выборки сигнала выполняются на интервале $\tau_{И}$ (рис.8). На данном интервале сигнал на выходе RC-цепи можно записать следующим образом:

$$U_{ВЫХ}(t) = \begin{cases} A_{\phi} \cdot e^{-\frac{t-\tau_{\phi}}{\tau_{RC}}}, & t \in [\tau_{\phi}, \tau_{\phi} + \tau_{И}] \\ A_{CP} \cdot e^{-\frac{t-\tau_{CP}}{\tau_{RC}}}, & t \in [\tau_{CP}, \tau_{CP} + \tau_{И}] \end{cases} \quad (8)$$

Сигнал отклика среды на зондирующую М-последовательность, осложненный пролезающей помехой, вычисляется как сумма сигнала отклика среды с сигналом пролезающей помехи (8). Из формулы (8) видно, что амплитуда пролезающей цифровой помехи зависит от двух параметров: длительности фронта (спада) цифрового сигнала и постоянной времени RC-цепи. Рассмотрим влияние этих параметров на «структурную помеху». Все временные параметры в модели задаются в дискретах времени. Для перехода к реальным физическим параметрам период дискретизации сигнала принят равным 18,3105 мкс, что соответствует периоду дискретизации сигналов в измерительном комплексе ЭРК ШПС. Максимальный

уровень сигнала на входе модели прием равным ± 1 . С учетом того, что амплитуда цифрового сигнала составляет примерно четвертую часть от шкалы АЦП, применяющегося в ЭРК ШПС, амплитуда цифрового управляющего сигнала A принята равной 0,5. Для лучшего прописывания сигнала использовались следующие значения параметров отклика среды на зондирующую М-последовательность: длительность минимального импульса М-последовательности равнялась четырем постоянным времени отклика среды; разрядность М-последовательности равнялась 11; число накоплений ВКФ равнялось 12.

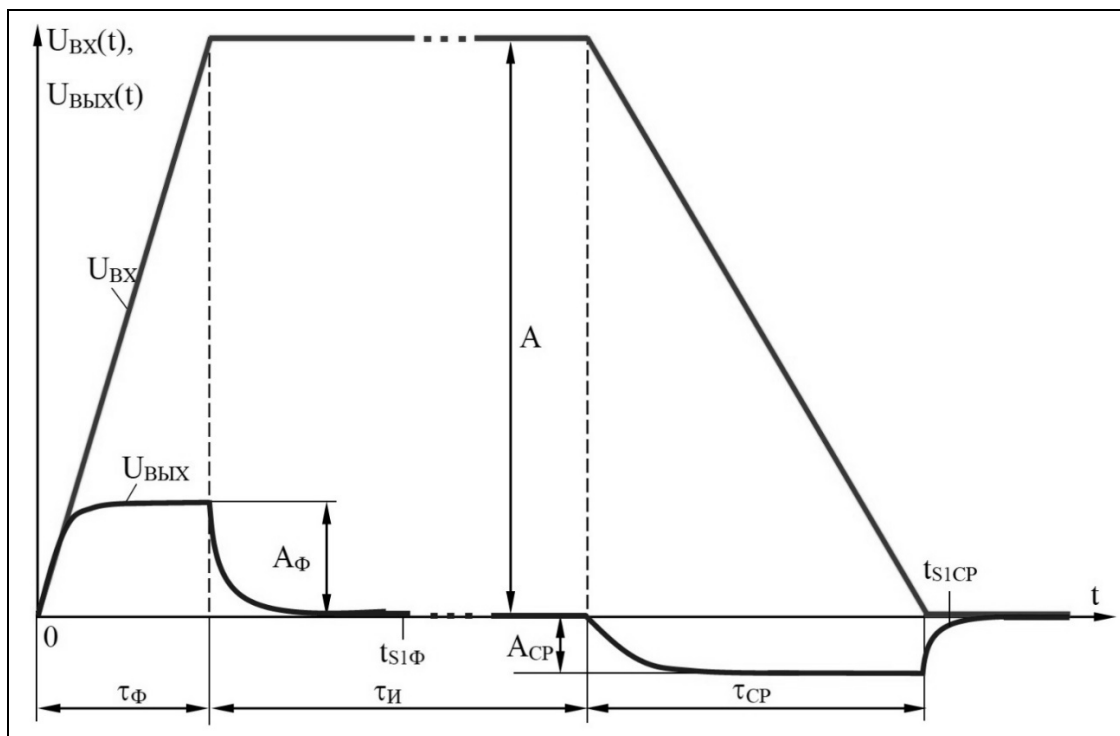


Рисунок 8 – Временная диаграмма модели помехи (синяя линия) вызванной пролезанием через паразитную дифференцирующую RC - цепь цифрового сигнала (красная линия): $U_{\text{ВХ}}$ – цифровой сигнал, поступающий на вход паразитной дифференцирующей RC - цепи; $U_{\text{ВЫХ}}$ – сигнал на выходе паразитной дифференцирующей RC - цепи; A – амплитуда цифрового сигнала; A_{Φ} – амплитуда на выходе RC-цепи в конце фронта нарастания цифрового сигнала; A_{CP} – амплитуда на выходе RC – цепи в конце спада цифрового сигнала; τ_{Φ} – длительность фронта цифрового сигнала; τ_{CP} – длительность спада цифрового сигнала; $\tau_{\text{И}}$ – длительность импульса цифрового сигнала; $t_{\text{S1}\Phi}$ – время начала первой выборки, отсчитываемое от начала фронта цифрового сигнала; $t_{\text{S1}\text{CP}}$ – время начала первой выборки, отсчитываемое от начала спада цифрового сигнала

На рис. 9 - приведены результирующие графики зависимости амплитуды «структурной помехи» ($A_{\text{П}}$) и соотношения сигнал/помеха ($A_{\text{С}}/A_{\text{П}}$) от длительности фронта (τ_{Φ}) цифрового сигнала при фиксированных значениях длительности спада цифрового сигнала и постоянной времени RC-цепи. Длительность фронта цифрового сигнала менялась в интервале от 0,000546 до 0,0546, что при выбранном периоде дискретизации соответствует интервалу от 10 нс до 1 мкс. Длительность спада цифрового сигнала принималась равной 0,00273, что соответствует 50 нс. Постоянная времени RC-цепи принималась равной 0,1 (примерно 1,8 мкс). Исследования показали, что увеличение разницы между длительностью фронта и спада цифрового сигнала приводит к росту амплитуды «структурной помехи» и уменьшению соотношения сигнал/помеха. При равенстве длительностей фронта и спада цифрового сигнала амплитуда «структурной помехи» стремится к нулю, то есть положительная и отрицательная части пролезавшей помехи полностью компенсируют друг

друга.

Для оценки влияния постоянной времени RC-цепи на «структурную помеху» ее значение менялось в интервале от 0,001 до 1, что при выбранном периоде дискретизации соответствует интервалу от 18 нс до 18 мкс. Длительность фронта цифрового сигнала принималась равной 0,0273, что соответствует 50 нс. Длительность спада цифрового сигнала принималась равной 0,00273, что соответствует 500 нс. На рис. 10 приведены результирующие графики зависимости амплитуды структурной помехи и соотношения сигнал/помеха от постоянной времени RC-цепи.

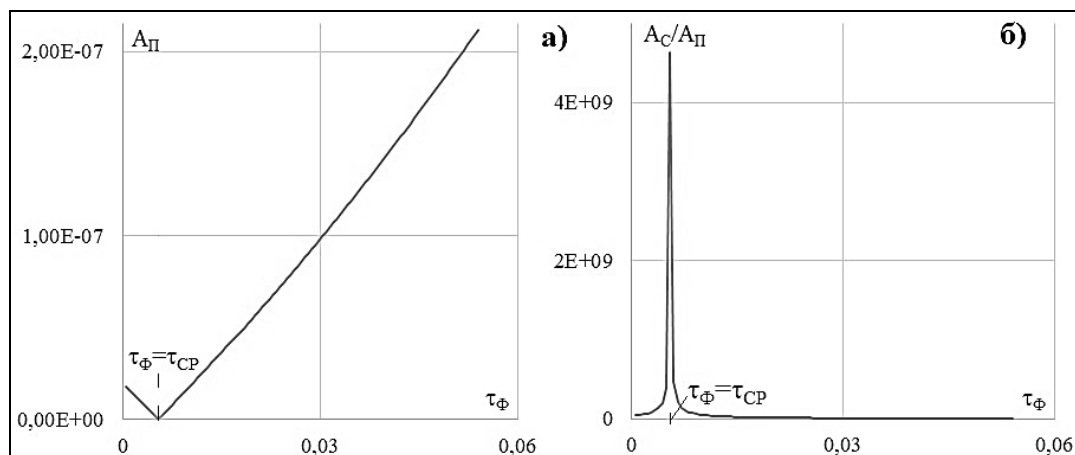


Рисунок 9 – Графики зависимости амплитуды структурной помехи (A_{Π}) - а) и соотношения сигнал/помеха ($A_{С}/A_{\Pi}$) – б) от длительности фронта (τ_{Φ}) цифрового сигнала

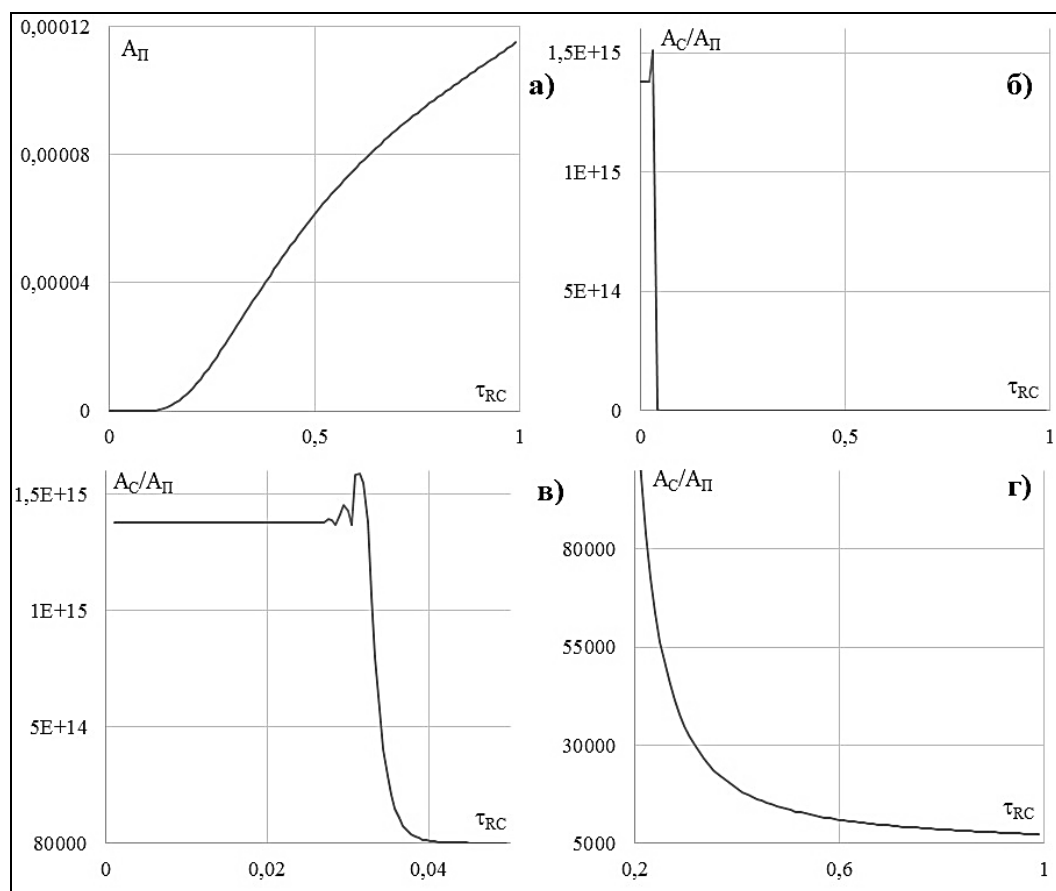


Рисунок 10 – Графики зависимости амплитуды структурной помехи (A_{Π}) - а) и соотношения сигнал/помеха ($A_{С}/A_{\Pi}$) – б), в), г) от постоянной времени RC-цепи при фиксированных значениях длительности фронта (τ_{Φ}) и спада ($\tau_{СР}$) цифрового сигнала

Согласно рис. 10 при увеличении постоянной времени RC-цепи амплитуда структурной помехи растет. На рис. 10 в) и г) приведены фрагменты графика 10 б) в увеличенном масштабе. Видно, что при достаточно малой постоянной времени RC-цепи амплитуда структурной помехи стремится к некоторой малой величине и при дальнейшем уменьшении практически не меняется. Это обусловлено тем что, при малой величине постоянной времени RC-цепи амплитуды A_{Φ} и A_{CP} (рис. 7) практически не зависят от длительности фронта (спада) цифрового сигнала и стремятся к его амплитуде. Разница уровней пролезающей помехи в момент первой выборки (после фронта и среза) определяется степенью удаленности времени первой выборки ($t_{s1\Phi}$, t_{s1CP}) от времени окончания фронта или среза цифрового сигнала соответственно. При этом разница уровней пролезающей помехи остается постоянной, что приводит к появлению горизонтального участка графика 10 в).

Результаты моделирования показали, что можно говорить о пролезающих в измерительный тракт цифровых сигналах как одной из причин появления «структурных помех». При этом уровень «структурных помех» тем больше чем больше разница между длительностями фронта и спада цифровых сигналов и увеличивается с ростом постоянной времени паразитной RC-цепи.

Выводы. Исследования, проведенные на математических моделях геоэлектроразведочного измерительного комплекса ЭРК ШПС позволили определить причины возникновения «структурных помех», возникающих при корреляционной обработке регистрируемых на приемной стороне шумоподобных сигналов отклика земной коры.

Оценка вклада каждого из источников в суммарный уровень «структурных помех» показала, что основной причиной, приводящей к появлению «структурных помех» являются нелинейные искажения сигналов, возникающие в измерительном тракте, включая исследуемый объект - земную кору.

Выявлена линейная связь между амплитудой «структурных помех» и величиной нелинейных искажений сигналов в измерительном тракте.

Литература

1. Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 2. С. 5–19.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.