

Повышение эффективности измерительной системы для малоглубинных зондирований методом переходных процессов

М.В. Шарлов¹, Н.О. Кожевников², Т.Н. Пестюрин¹

¹ООО «СИГМА-ГЕО», sharlov@sigma-geo.ru

²ИНГГ СО РАН, kozhevnikovno@ipgg.sbras.ru

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы снижения стартовой глубины зондирований в методах импульсной индуктивной электроразведки с установками малых размеров. Обсуждаются факторы, осложняющие получение достоверных результатов измерений. На примере измерителя аппаратуры FastSnap оценивается вклад собственного отклика измерительной системы в результирующую переходную характеристику. Приводится пример возможного технического решения, снижающего влияние собственного отклика входного тракта на измеряемую ЭДС, оцениваются результаты полевых измерений.

Ключевые слова: переходная характеристика, измерительный тракт, собственный отклик, метод переходных процессов

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в импульсной индуктивной электроразведке (ЗСБ/МПП) наблюдается устойчивая тенденция к применению установок все меньшего размера с целью снижения стартовой глубины зондирований, особенно при изучении верхней части разреза (ВЧР). Однако при использовании таких установок возникают особые требования к измерительной системе и методике съемки.

Для изучения малых глубин необходимо начинать регистрацию переходного процесса на ранних – порядка микросекунды или долей микросекунды – временах (Kozhevnikov and Sharlov, 2019). Измерительный тракт аппаратуры должен обеспечивать соответствующий частотный и динамический диапазоны, что достигается применением быстродействующих АЦП и широкополосных инструментальных усилителей.

Измеряемый в результате возбуждения нестационарного электромагнитного поля спад ЭДС представляет свертку переходной характеристики геологической среды и собственного отклика измерительной системы (Foged et al., 2013).

При этом режимы и параметры измерений, такие как ток в генераторной петле, коэффициент усиления измерительного канала и т. п. влияют на раннюю и/или позднюю стадии результирующей переходной характеристики.

Ранее в работах (Шарлов и др., 2018; Шарлов и Кожевников, 2019; Sharlov and Kozhevnikov, 2018) нами исследовались особенности измерений на поздних временах, связанные с аномальным замедлением спада

результирующей ЭДС.

Измерения на ранних временах при изучении малых глубин связаны с собственными техническими проблемами. Прежде всего, необходимо располагать оценкой собственного отклика измерительной системы на ранних временах и способами снижения или учета его влияния на результирующую переходную характеристику. В настоящей работе мы рассмотрим данный вопрос на основе результатов лабораторного и полевого экспериментов.

Экспериментальная часть работы выполнена с цифровой аппаратурой FastSnap. Обработка данных проведена с помощью программного пакета TEM-Processing (Sharlov et al., 2017).

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РАНИХ ВРЕМЕНАХ

Рассматривая вопрос измерения откликов на ранних временах, можно выделить несколько осложняющих факторов, затрудняющих получение достоверного результата.

Как известно (Meju, 1995), стартовую глубину зондирования удобно оценивать по формуле:

$$h = k\sqrt{\rho t}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление земли (Ом·м); t – время, прошедшее с момента выключения тока в генераторной петле (сек); k – масштабный коэффициент (обычно в диапазоне от 400 до 700).

Задавшись минимальной, или стартовой, глубиной зондирования h_{\min} , из формулы 1, можно найти выражение для начального

(минимального, стартового) времени измерений t_{min} :

$$t_{min} = \frac{h_{min}^2}{k^2 \rho} \quad (2)$$

Эта формула показывает, что уменьшение стартовой глубины зондирования приводит к необходимости измерений на все более ранних временах, особенно при изучении слабо проводящих пород (Кожевников и Плотников, 2004; Kozhevnikov and Sharlov, 2019).

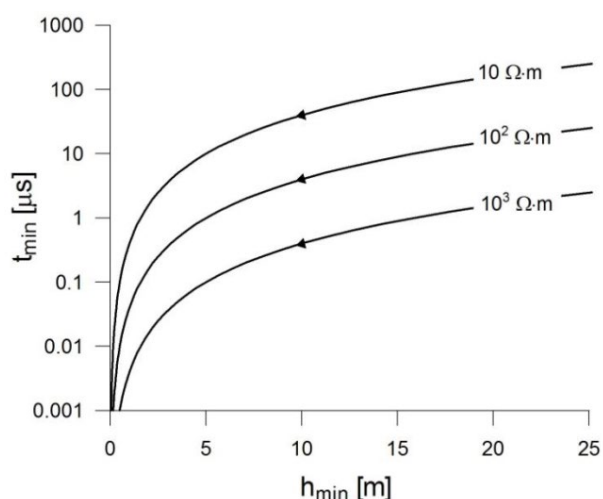


Рисунок 1. Графики зависимости t_{min} от минимальной глубины зондирования h_{min} . Шифр графиков – удельное электрическое сопротивление полупространства; $k = 500$.

Для измерений в микросекундном диапазоне необходимо работать генераторными петлями малых размеров, так как именно генераторная петля является наиболее инерционным элементом измерительной системы. Наряду со специфическими проблемами, связанными с необходимостью быстрого выключения тока в генераторной петле (Kozhevnikov et al., 2020; Шарлов и др., 2021), уменьшение ее размера сопровождается резким падением уровня полезного сигнала (Кожевников и Плотников, 2004; Kozhevnikov and Sharlov, 2019).

Для решения указанной проблемы необходимо использовать измерительный тракт, включающий, помимо быстродействующего АЦП, высокочастотный широкополосный операционный усилитель (ОУ) с контролируемым коэффициентом усиления (КУ). Это позволяет повысить измеряемый сигнал до необходимого уровня. На рисунке 2 показана упрощенная схема измерительного тракта, содержащего широкополосный ОУ и быстродействующий АЦП.

Вместе с тем, работая с аппаратурой FastSnap, структура измерителя которой аналогична показанной на рисунке 2, мы неоднократно

сталкивались с ситуацией, когда при изучении слабо проводящих сред результаты измерений на ранних временах с генераторными петлями малых (25×25 м и менее) размеров не находили разумного геологического объяснения.

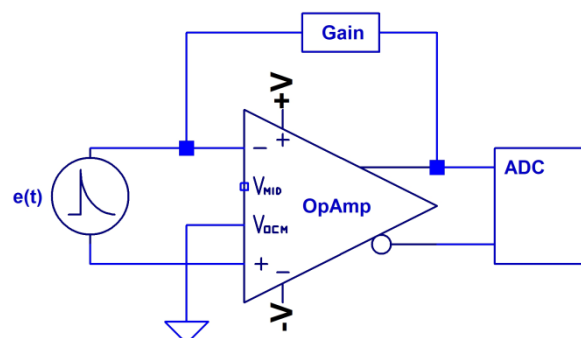


Рисунок 2. Источник сигнала (приёмная петля), широкополосный операционный усилитель с задаваемым коэффициентом усиления и быстродействующий АЦП.

На рисунке 3 приведены осложненные переходные характеристики, измеренные в западном Прибайкалье соосной установкой с генераторной петлей 25×25 м. В месте проведения измерений разрез сложен метаморфическими породами с высоким ($400 - 500$ Ом·м) удельным сопротивлением. На времени $8 - 10$ мкс наблюдается смена знака полярности ЭДС.

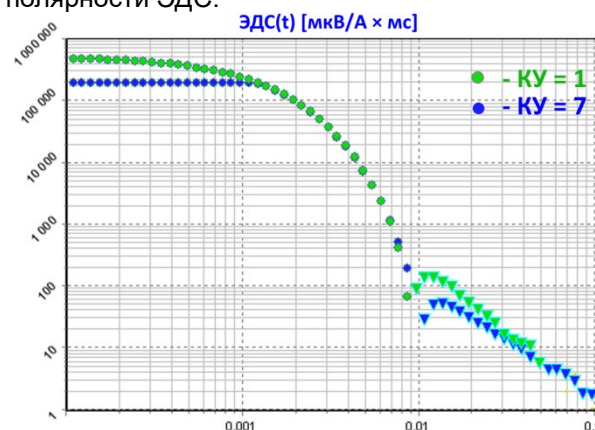


Рисунок 3. Переходные характеристики, измеренные с генераторной петлей размером 25×25 м при разном КУ измерительного тракта: зеленый график КУ = 1; красный график КУ = 7. Маленькими треугольниками показана ЭДС отрицательной полярности.

Переходные процессы, измеренные при токе в генераторной петле 0.7 А с коэффициентами усиления 1 (зеленый график) и 7 (синий график) совпадают до времени порядка $6 - 7$ мкс. Однако на более поздних временах между переходными характеристиками наблюдается расхождение.

ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННОГО ОТКЛИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА АППАРАТУРЫ FASTSNAP

Зависимость результатов измерений от коэффициента усиления свидетельствует о том, что собственный отклик измерительного тракта вносит существенный вклад в результирующую переходную характеристику.

Как отмечалось выше (см. рисунок 2), основными элементами измерительного тракта являются операционный усилитель и АЦП. Для изучения собственной переходной характеристики входного тракта мы провели лабораторные измерения с источником сигнала в виде генератора напряжения прямоугольной формы с коротким (менее 100 нс) срезом. Генератор подключался непосредственно к входу измерителя. Амплитуда прямоугольного импульса напряжения составляла 0.7 В, длительность – 32 мкс. Запись собственного отклика измерителя производилась с частотой дискретизации 40 МГц при различных значениях КУ. Лабораторные измерения подтвердили наблюдавшуюся в поле зависимость регистрируемой ЭДС от КУ (см. рисунок 4).

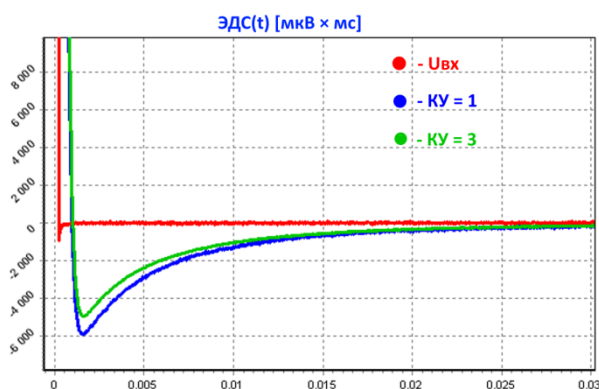


Рисунок 4. Переходные характеристики измерительного тракта в зависимости от КУ: красный график – входное ступенчатое напряжение; синий график при КУ = 1; зеленый график при КУ = 3.

Как видно на рисунке 4, на ранних временах наблюдается смена полярности ЭДС с последующим асимптотическим приближением к нулю. Аналогичные переходные процессы наблюдаются в поле при изучении слабо проводящих пород, когда полезный сигнал быстро падает до уровня шумов.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НА РАННИХ ВРЕМЕНАХ

Для измерения на ранних временах измерительный тракт аппаратуры FastSnap был модифицирован в соответствии со схемой, представленной на рисунке 5.

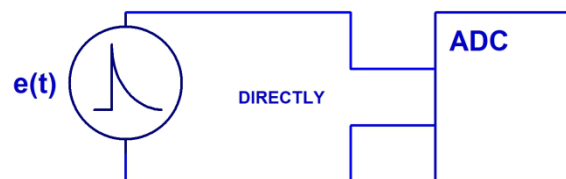


Рисунок 5. Модифицированная схема входного тракта измерителя FastSnap с прямым подключением источника сигнала к АЦП.

Как показано на рисунке 5, из схемы, приведенной на рисунке 2, исключен ОУ, а источник ЭДС через согласующие резисторы подключен непосредственно к АЦП. Для новой схемы, также как и в предыдущем случае, мы измерили отклик на воздействие прямоугольным импульсом напряжения. На рисунке 6 приведены графики переходных характеристик новой и предыдущей (при КУ=1) схем.

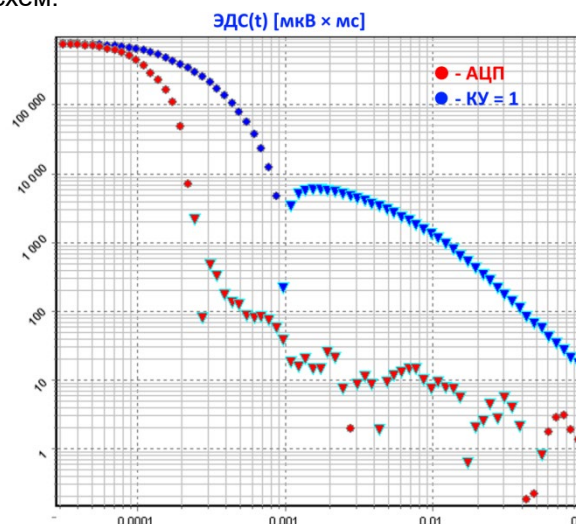


Рисунок 6. Собственные отклики входных трактов: синий график – с операционным усилителем (КУ=1), красный график – с непосредственным подключением источника сигнала к АЦП. Маленькими треугольниками показано выходное напряжение отрицательной полярности.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По сравнению традиционной схемой входного тракта схема с прямым подключением источника сигнала к АЦП имеет более короткий (менее 1 мкс) собственный отклик. Благодаря этому на ранних временах снижается влияние собственной переходной характеристики входного тракта на результирующую переходную характеристику. Разумеется, при этом снижается чувствительность и, соответственно, возрастает уровень шумов. Однако, комбинация измерений на ранних

временах в режиме прямого включения АЦП и измерений на поздних временах с традиционной схемой с ОУ позволяет измерить переходную характеристику в широком временном диапазоне.

На рисунке 7 приведены кривые кажущегося удельного сопротивления $\rho_T(t)$, измеренные с помощью как традиционного, так и основанного на прямом включении АЦП входных трактов.

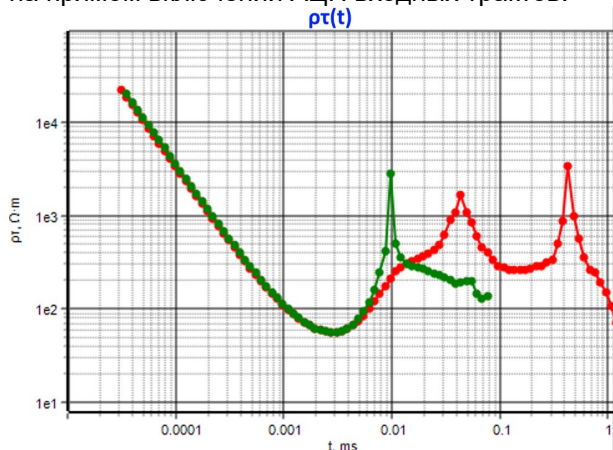


Рисунок 7. Кривые $\rho_T(t)$, измеренные с генераторной петлей размером 25×25 м с традиционным входным трактом (зеленая кривая) и при прямом включении АЦП (красная кривая).

Как видно из рисунка 7, измерения с прямым включением АЦП позволили получить кривую $\rho_T(t)$, интерпретируемую в широком временном диапазоне (красный график). Нарушение монотонности кривой (острые пики на временах 40 и 400 мкс) связаны с проявлением быстропотекающей вызванной поляризации мерзлых пород.

Выводы

Снижение начальной глубины зондирования при работе с установками малых размеров сопряжено с необходимостью выполнять измерения на временах порядка 1 мкс и менее. Основным осложняющим фактором, особенно при изучении слабо проводящих геологических сред установками малого размера, является драматическое снижение уровня полезного сигнала. Это приводит к тому, что определяющий вклад в результирующую переходную характеристику вносит не отклик от геологической среды, а собственная переходная характеристика измерительной системы.

Одним из способов решения этой проблемы является модификация традиционной схемы измерительного тракта, позволяющая снизить собственный отклик измерительной системы. Модификация входного тракта измерителя аппаратуры FastSnap заключалась в

исключении ОУ из цепочки «Источник сигнала – АЦП». Благодаря этому удалось при изучении слабо проводящих мерзлых пород установкой с генераторной петлей малого размера измерить переходные характеристики, свободные от влияния собственного отклика измерительной системы на ранних временах.

ЛИТЕРАТУРА

Кожевников НО, Плотников АЕ, 2004 Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза. *Геофизика*, №6, с 33-38.

Шарлов МВ, Кожевников НО, Шелухов ИА 2018 Аномальное замедление спада ЭДС индукционного переходного процесса при работе соосными установками с небольшими генераторными петлями. Тезисы конференции «Инженерная и рудная геофизика 2018». Алматы, Казахстан.

Шарлов МВ, Кожевников НО 2019 Влияние собственного отклика измерительной системы на результаты измерений в методе переходных процессов. Тезисы конференции «Инженерная и рудная геофизика 2019». Геленджик, Россия.

Шарлов МВ, Кожевников НО, Пестурин ТН 2021 Влияние эффектов запаздывания при выключении тока в генераторной петле на индукционные переходные характеристики. Тезисы конференции «Инженерная и рудная геофизика 2021». Геленджик, Россия.

Foged N, Auken E, Christiansen AV and Sørensen KI 2013 Test-site calibration and validation of airborne and ground-based TEM systems. *Geophysics*, VOL. 78, NO. 2, P. E95–E106.

Kozhevnikov N, Sharlov M 2019 Early-Time and Late-Time Limitations on the Performance of Near-Surface TEM Measuring Systems. Extended abstr “Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2019”, The Hague, Netherlands. doi: 10.3997/2214-4609.201902382

Kozhevnikov NO, Sharlov MV, Stefanenko SM 2020, Turning off low and high currents in a transmitter loop used in the transient electromagnetic method. *Geophysical Prospecting*, 68, p. 1676 – 1688.

Meju MA 1995 Simple effective resistivity-depth transformations for infield and real-time data processing. *Computers & Geosciences*, 21(8), p. 985-992.

Sharlov MV, Buddo IV, Misyurkeeva NV, Shelokhov IA, Agafonov YuA. 2017 Transient electromagnetic surveys for high-resolution near-surface exploration: basics and case studies. First Break 35, p. 63–71.

Sharlov M, Kozhevnikov N 2018 Intrinsic response of a TEM measuring unit as cause of slowly decaying anomalous transients. Abstracts “24th EM Induction Workshop”, Helsingør, Denmark.