

Y11-05

Influence of the Intrinsic Response of the Measuring System to the Tem Measurement Results

M. Sharlov, N. Kozhevnikov

Summary

We discuss decrease in the decay rate of the TEM voltage response in cases when TEM soundings are performed using central loop arrays with small-size transmitter loops. We show that the cause of the slowly decaying central loop TEM voltage response is the intrinsic transient response of the measuring amplifier. This effect is the more noticeable the smaller the transmitter loop and/or the more resistive the ground. The effect is not observed when the receiver loop is located outside the transmitter loop. Inversion of the late time TEM response without regards to the intrinsic response of measuring unit results in appearance of nonexistent conductive ground layers and thus in misinterpretation of the TEM data. To reduce the intrinsic transient response of the measuring amplifier, the following may be useful: reduction of the latest measurement time, subtracting the intrinsic transient response from the total one, disconnection of the amplifier from the receiver loop during the current turnoff in the transmitter loop.

Влияние собственного отклика измерительной системы на результаты измерений в методе переходных процессов

М.В. Шарлов* (ООО «СИГМА-ГЕО»), Н.О. Кожевников (ИНГГ СО РАН).

Введение

Методы импульсной индуктивной электроразведки (ЗСБ/МПП) в малоглубинной модификации широко применяются для решения различных геолого-геофизических задач (гидрогеология, рудные задачи, изучение многолетнемерзлых пород и др.). Особый интерес малоглубинные зондирования могут представлять для комплексирования с результатами глубинных измерений, а также для учета статических поправок при обработке сейсморазведочных данных, когда верхняя часть разреза (ВЧР) имеет неоднородное строение (Shelokhov et al., 2017). Большую популярность такие комплексные исследования имеют в России, где только за последние несколько лет съемкой были покрыты территории площадью в сотни кв. км. (Sharlov et al., 2017d).

Результаты подобных измерений охватывают широкий диапазон глубин, начиная с первых метров и заканчивая несколькими сотнями метров, что в свою очередь определяет особые требования к измерению переходных характеристик. Динамический диапазон, в котором осуществляется регистрация убывающей во времени ЭДС переходного процесса составляет 140 – 180 dB. Для изучения малых глубин необходимо начинать регистрацию переходного процесса на ранних – порядка микросекунды или долей микросекунды – временах. Измерительный тракт аппаратуры должен обеспечивать соответствующий частотный и динамический диапазоны, что достигается применением быстродействующих АЦП и широкополосных инструментальных усилителей.

Таким образом, для регистрации переходных характеристик геологической среды в методах импульсной электроразведки применяются сложные измерительные системы, включающие в себя коммутатор тока и измеритель для возбуждения и регистрации э.м. поля, генераторную и приемные петли или датчики, а также линии связи (кондукторы) для передачи цифровых и/или аналоговых сигналов. Неотъемлемым компонентом системы, в значительной степени влияющим на качество получаемых данных, является встроенное или внешнее программное обеспечение для обработки сигналов.

В процессе возбуждения и измерения нестационарных электромагнитных полей переходная характеристика геологической среды (полезный отклик) сворачивается с собственным откликом измерительной системы (суперпозицией собственных откликов компонентов измерительной системы в случае, если система линейна). При этом каждый компонент системы оказывает то или иное влияние, затрагивая раннюю и/или позднюю стадию измеряемого переходного процесса. Поэтому для повышения достоверности получаемых материалов важным является оценка собственного отклика измерительной системы, как источника систематической погрешности в результатах измерений.

Известны различные методики оценки измерительной системы, применяемые как в лабораторных, так и полевых условиях (Foged et al., 2013; Sapial et al., 2015; Zakharkin, Tarlo, 1999; Kozhevnikov, 2012). В большинстве случаев пристальное внимание при изучении собственного отклика измерительной системы уделяется процессам, происходящим на ранних временах, и, соответственно, оказывающим наибольшее влияние при изучении ВЧР (Kozhevnikov, Nikiforov, 2002). Некоторые результаты наших исследований, посвященных тестированию измерительных систем на ранних временах, отражены в работе (Sharlov et al.,

2017c). Цифровая обработка и фильтрация сигналов, применительно к получению итоговых переходных характеристик из исходных «сырых» данных, а также учет влияния обработки на ранние времена измерения рассматривается в работах (Sharlov, 2017b; Sharlov, 2017c).

Некоторые особенности поздних времен переходных характеристик исследовались нами ранее. Напомним, что аномальное замедление спада ЭДС на поздних временах для соосной установки по сравнению с разнесенной установкой отмечалось нами в случае, когда измерения выполнялись соосно-разнесенными установками малого размера (размер генераторной петли 100×100 м и менее), сильнее проявляясь при зондировании геологических сред с большим удельным сопротивлением пород. Согласно нашим исследованиям, обсуждаемый эффект наблюдается независимо от используемой аппаратуры (Sharlov et al., 2018). Другие исследователи также отмечали аналогичные эффекты (Geidetzka, 2002; Descloitres et al., 2008). В данной работе мы, используя полученные нами данные полевого и лабораторного экспериментов, подробно рассматриваем данное явление и причины его возникновения.

Экспериментальная часть работы выполнялась с цифровой аппаратурой FastSnap. Обработка и инверсия данных выполнялись в программном обеспечении TEM-Processing и Model3 соответственно (Sharlov et al., 2017d).

Результаты и обсуждение

Для исследования поведения индукционных откликов на поздних временах мы в 2017 – 2018 гг. провели тестовые работы на уникальном природном полигоне – акватории оз. Байкал (Sharlov et al., 2017a). Благодаря большой глубине пресной воды (более 1000 м) данный полигон представляет собой практически идеальную геоэлектрическую модель с известными параметрами (см. Рисунок 1А). Работы выполнялись со льда ранней весной, измерения проводились с большим количеством установок разных размеров. Пример измеренных индукционных переходных характеристик, на которых отмечается эффект аномального замедления спада ЭДС приведен на Рисунке 1В, С.

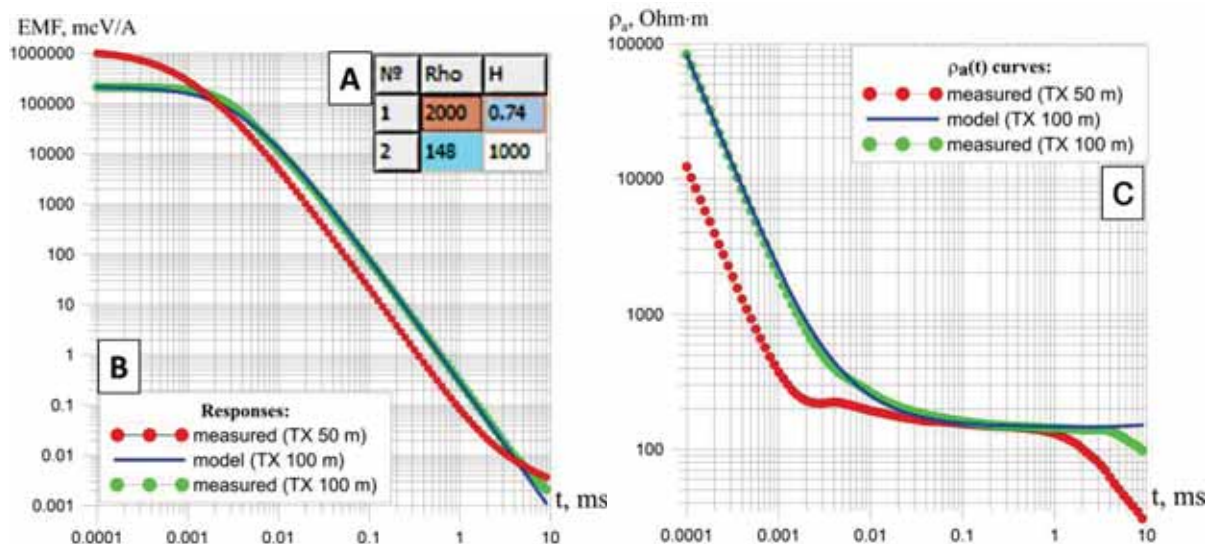


Рисунок 1. Геоэлектрическая модель – (А) и переходные характеристики в трансформациях ЭДС(t) – (В) и $\rho(t)$ – (С).

Как можно увидеть на Рисунке 1В, переходные характеристики, измеренные с генераторными петлями 50×50 м (красный график) и 100×100 м (зеленый график) на поздних временах убывают медленнее, чем отклик, рассчитанный по известной модели (синий график). При этом ЭДС, измеренная от генераторной петли 50×50 м, на позднем времени спадает наиболее

медленно, что свидетельствует об усилении наблюдаемого эффекта с уменьшением размера установки. На кривых кажущегося удельного сопротивления ρ_a (Рисунок 1С) данный эффект проявляется как неуклонное снижение кажущегося сопротивления с течением времени. Для установок с генераторными петлями 100×100 м и 50×50 м эффект снижения сопротивления проявляется, начиная со времени $t \geq 4 - 5$ мс и $t \geq 1$ мс, соответственно. Очевидно, что инверсия этих кривых приведет к появлению в геоэлектрических моделях проводящих слоев, которых нет в действительности, причем результирующие модели будут отличаться для установок разных размеров, несмотря на то, что кривые получены в одном и том же месте.

Зная, что реальная геоэлектрическая модель не содержит проводящих слоев, мы пришли к выводу, что наблюдаемый эффект не может быть связан с геологией и вероятнее всего вызван влиянием собственного отклика измерительной системы. Так как наблюдаемый эффект проявляется на относительно поздних временах становления, когда ток в источнике уже выключен, мы сосредоточились на изучении входного тракта измерителя FastSnap. Его основу составляет АЦП AD9244-65 фирмы Analog Devices вместе с высокочастотным инструментальным усилителем AD8138, рекомендованным производителем.

Для увеличения соотношения Сигнал/Шум измеряемых на поздних временах сигналов, в станции FastSnap используется большой ток (30 А и более). В измерителе устанавливается максимально возможный коэффициент усиления (Sharlov et al., 2017d). В частности, поздняя стадия кривых, показанных на Рисунке 1В,С, была измерена при коэффициенте усиления (КУ) 140. Известно, что любой операционный усилитель, особенно при большом КУ имеет собственную переходную характеристику. Воздействие на вход операционного усилителя ступенчатого напряжения приводит к появлению на его выходе медленно спадающего напряжения небольшой величины – «длинного хвоста» (Dostal, 1981).

Для изучения переходной характеристики входного тракта мы провели лабораторные измерения. В качестве источника сигнала служил генератор напряжения прямоугольной формы с коротким (100 нс) срезом. Генератор подключался непосредственно к входу измерителя. Длительность подаваемого прямоугольного импульса напряжения амплитудой 1 В составляла 32 мкс. Запись собственного отклика производилась при максимальном КУ равном 140. Подаваемое на вход напряжение (красный график) и измеренный отклик (синий график) показаны на Рисунке 2А.

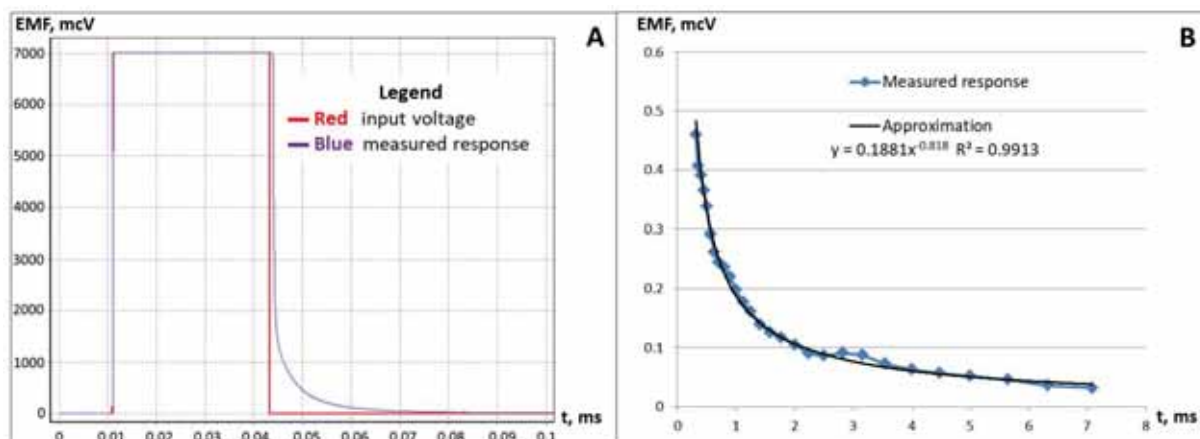


Рисунок 2. Входное напряжение прямоугольной формы и переходная характеристика измерительного тракта, полученная при КУ=140 (А). Измеренная переходная характеристика на поздних временах и ее аппроксимация степенной функцией (В).

На Рисунке 2В приведена переходная характеристика входного тракта, измеренная до времени 7 мс. Амплитуда медленно спадающего «длинного хвоста» на времени порядка 300 мкс составляет 0.45 мкВ и с течением времени уменьшается до 0.05 мкВ (или $5 \cdot 10^{-6}$ % от начальной

амплитуды 1 В) на отметке 7 мс. Форма «длинного хвоста» описывается степенной функцией $y = 0.1881 \cdot x^{-0.818}$ (черный график, Рисунок 2В).

Для оценки вклада собственного отклика измерителя в суммарную переходную характеристику сигнал мы провели математическое моделирование и сравнили рассчитанные и экспериментальные переходные характеристики. На Рисунке 3А показана результирующая переходная характеристика (красный график), полученная путем суммирования отклика от геоэлектрической модели (зеленый график) и собственного отклика измерителя (синий график). На поздних ($t \geq 1$ мс) временах на графике суммарной ЭДС отчетливо видно anomalous замедление скорости спада. Результирующая модельная переходная характеристика практически совпадает с измеренной на льду оз. Байкал (см. Рисунок 3В). В диапазоне времен 0.1 – 10 мс среднеквадратическое расхождение между измеренной (красный график) и модельной (зеленый график) кривыми кажущегося сопротивления не превышает 2%.

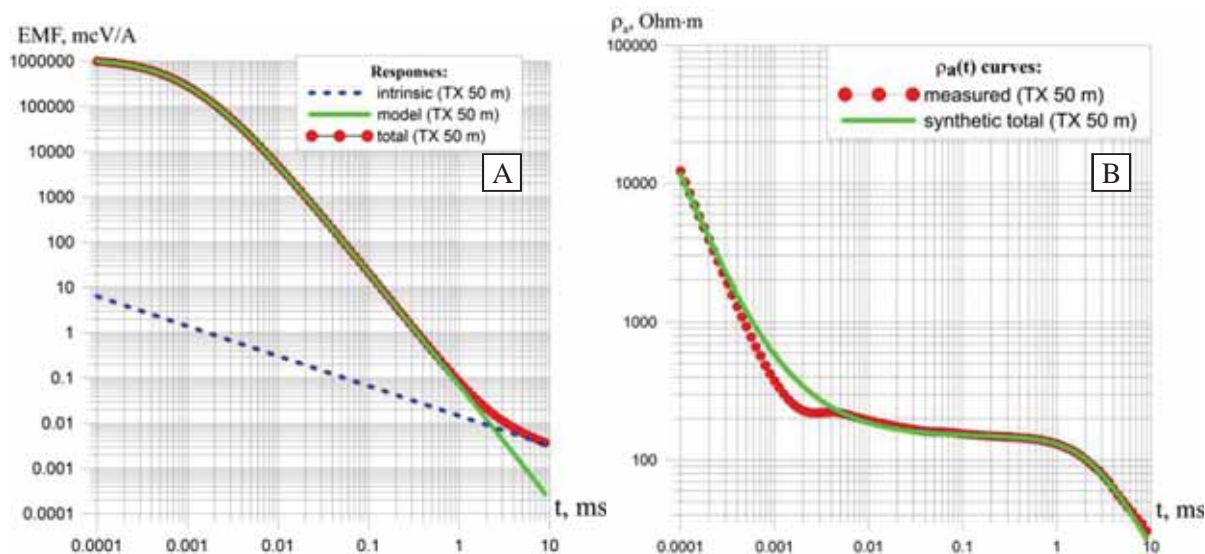


Рисунок 3. Переходные характеристики, рассчитанные для соосной установки с размером генераторной петли 50 × 50 м (А). Рассчитанная и измеренная кривые кажущегося удельного сопротивления для соосной установки с размером генераторной петли 50 × 50 м (В).

Как показали наши дальнейшие исследования, амплитуда собственного отклика операционного усилителя прямо пропорциональна амплитуде ступенчатого напряжения, воздействующего на вход усилителя. Это согласуется с результатами, приводимыми другими авторами, например (Dostal, 1981). Однако при уменьшении амплитуды воздействия, начиная с некоторой «пороговой» величины, наблюдается другая картина: в какой-то момент времени напряжение на выходе ОУ изменяет полярность и быстро убывает.

Этот факт объясняет отсутствие «длинного хвоста» при работе с разнесенными установками. В этом легко убедиться, сравнив отклики на Рисунке 4, измеренные с соосной (красный график) и разнесенной (зеленый график) установками от одной генераторной петли. При работе с разнесенной установкой после смены знака переходной характеристики, связанного с особенностями распространения вихревых токов в окрестностях генераторной петли, амплитуда ЭДС составляет менее 10 мВ, что на два с лишним порядка меньше, чем стартовая амплитуда ЭДС для соосной установки. Воздействие на ОУ в случае измерения разнесенной установкой достаточно слабое и не вызывает появления заметного «длинного хвоста» на поздних временах. Таким образом, при прочих равных условиях, результат измерения разнесенной установкой на поздних временах менее подвержен влиянию собственных процессов в измерительном тракте и более достоверно отражает реальное геоэлектрическое строение разреза, особенно при изучении разреза, сложенного породами с высоким удельным электрическим сопротивлением.

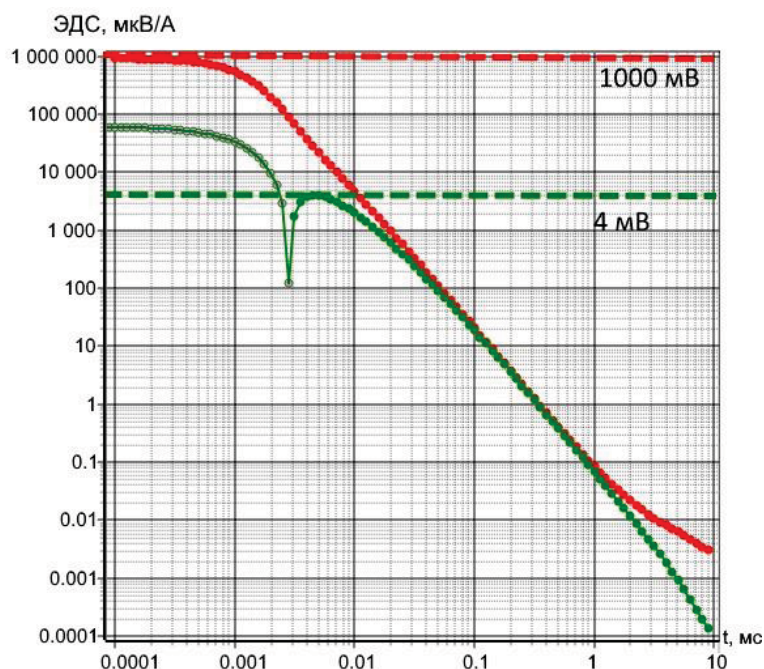


Рисунок 4. Переходные характеристики для соосной (красный график) и разнесенной (зеленый график) установок, измеренные от одной генераторной петли размером 50×50 м.

Отмеченный «артефакт» проявляется сильнее при изучении слабо проводящих сред, поскольку в этом случае сигнал становления быстро падает до уровня, сопоставимого с собственным откликом измерителя. При этом на результирующей переходной характеристике появляется «длинный хвост» в виде аномального замедления спада ЭДС. Усилению данного эффекта способствует и тот факт, что при прочих равных условиях амплитуда первичной ЭДС, индуцируемой в приемной петле и воздействующая на вход измерителя во время выключения тока в генераторной петле, тем больше, чем выше удельное электрическое сопротивление геологической среды.

Выводы и рекомендации

Средствами полевого и лабораторного эксперимента изучен вклад собственного отклика входного тракта измерителя FastSnap в результирующую переходную характеристику, измеряемую в импульсной индуктивной электроразведке. В той или иной мере эффект «длинного хвоста» всегда присущ операционным усилителям, в том числе используемым в современных измерительных системах для метода переходных процессов. В этой связи особую актуальность приобретает разработка методики для тестирования и/или калибровки измерительных трактов аппаратуры, используемой в импульсной индуктивной электроразведке.

Инверсия данных, полученных соосными установками малых размеров, без учета собственного отклика измерительного тракта может приводить к большим ошибкам геологической интерпретации, а именно появлению не существующих проводящих слоев.

Для снижения влияния «длинных хвостов» мы рекомендуем следующее:

- регистрация ЭДС во временном диапазоне, в пределах которого вклад собственного отклика измерительной системы в суммарный сигнал не превышает допустимого;
- вычитание собственного отклика измерительной системы из наблюдаемых данных;
- электронная «блокировка» (отключение входа) ОУ от воздействия первичной ЭДС большой амплитуды во время выключения тока в генераторной петле.

Благодарности

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00363 «Математическое моделирование и экспериментальное изучение индукционных переходных процессов тока в замкнутой горизонтальной петле с учетом влияния подстилающей среды».

References

- Descloitres, M., Laurent, J.-P., Morra, Ch., Clément, R., Oxarango, L., and Gourc, J.-P. (2008). Monitoring Resistivity in Non-Hazardous Waste Landfill Using Time Domain Electromagnetism (Drôme, France). EAGE 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Kraków, Poland, 15 - 17 September 2008.
- Dostal, J. (1981) Operational amplifiers. ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, Amsterdam – Oxford – New York.
- Foged, N., Auken, E., Christiansen, A.V., and Sørensen, K. I. (2013) Test-site calibration and validation of airborne and ground-based TEM systems. Geophysics, VOL. 78, NO. 2, P. E95–E106.
- Geidetzka, A. (2002) Erste Erfahrungen mit der Nano TEM - Apparatur. Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, Köln.
- Kozhevnikov, N.O. (2012) Testing TEM systems using a large horizontal loop conductor. Russian Geology and Geophysics, 53, 1243–1251.
- Kozhevnikov, N.O., and Nikiforov, S.P. (2002) An illustrative approach to estimating the near-surface TEM system potentialities. 64th EAGE Conference, Expanded Abstracts. - 2002, Florence, D-43
- M.V. Sharlov, N.O. Kozhevnikov, R.V. Sharlov (2017a) Lake Baikal – A Unique Site for Testing and Calibration of Near-surface TEM Systems. Near Surface Geoscience 3-7 September 2017, Malmö, Sweden. 5 pp. doi: 10.3997/2214-4609.201702038
- M.V. Sharlov, N.O. Kozhevnikov, I.A. Shelokhov (2018). Unexpected dependence of the late-time transient response on the size and configuration of a TEM array. Engineering and Mining Geophysics – 2018. Extended Abstracts.
- Sapial V., Viezzoli A., Menghini A., Marchetti M., Chiappini M. (2015) The Italian reference site for TEM methods. Annals of Geophysics, 58, 5, G0548; doi:10.4401/ag-6805
- Sharlov, M.V. (2017b) Integrated approach to processing and inversion of shallow TEM data: evaluation of efficiency according to modeling results. Engineering Geophysics - 2017. Extended Abstracts.
- Sharlov, M.V. (2017c) An integrated system of processing and inversion of transient electromagnetic data. Pribery i Sistemy Razvedochnoi Geofiziki 38 (2), 24 – 35.
- Sharlov, M.V., Buddo, I.V., Misyurkeeva, N.V., Shelokhov, I.A., Agafonov, Yu.A. (2017d). Transient Electromagnetic Surveys for High-Resolution Near-Surface Exploration: Basics and Case Studies. FirstBreak, Vol. 35, September 2017, 63 – 71.
- I.A. Shelokhov, I.V. Buddo, M.V. Sharlov, and Yu.A. Agafonov [2018] Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. First Break, 36 (10), P. 47-51
- Zakharkin, A.K., Tarlo, N.N. (1999) Metrological support of TEM measurements. Geofizika, N6, 34 – 39.