

Е. Ю. Антонов^{1}, Н. О. Кожевников¹, М. А. Корсаков¹*

Сравнение двух способов расчета ранней стадии переходных процессов в методе импульсных индукционных зондирований

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: antonovey@ipgg.sbras.ru

Аннотация. При измерениях методом индукционных импульсных зондирований для получения информации о верхней части разреза необходимо регистрировать сигнал, начиная с как можно более ранних времен. Обычно регистрация ЭДС переходного процесса начинается после выключения тока в источнике. Отключение тока в генераторной петле не происходит мгновенно. Современная аппаратура позволяет вести запись ЭДС переходного процесса во время выключения тока, спадающего от стационарного значения до нуля. После отключения от источника в петле возникают собственные колебания тока. Их период определяет минимальное время, в течение которого может быть выключен ток в генераторной петле и, соответственно, минимальную глубину зондирований. В статье рассматривается поведение нестационарной ЭДС с учётом колебательных процессов, возникающих при выключении тока в генераторной петле. Основным методом исследования было математическое моделирование. Использовались два способа расчета: 1) на основе представления петли в виде набора электрических диполей, последовательно отключающихся в процессе прохождения прямой и обратной волн тока по периметру петли; 2) расчет свертки ЭДС от ступенчатого выключения тока с функцией специального вида, зависящей от времени. Расчеты показали хорошее совпадение результатов вычислений по обоим алгоритмам.

Ключевые слова: индуктивная электроразведка, выключение тока, длинные линии

E. Yu. Antonov^{1}, N. O. Kozhevnikov¹, M. A. Korsakov¹*

Comparison of two methods of calculating the early stage of transition processes in the method of impulse induction sounding

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: antonovey@ipgg.sbras.ru

Abstract. When measuring the method of induction impulse soundings to obtain data of the upper part of the ground, it is necessary to record a signal as early as possible. Typically, registration of the EMF of the transition process begins after turning off the current in the source. Disconnecting the current in the generator loop does not occur instantly. Modern equipment allows to record the EMF of the transition process during turning off the current falling from the stationary value to zero. After disconnecting from the source in the loop, the current fluctuations arise. Their period determines the minimum time during which the current can be turned off in the generator loop and, respectively, the minimum depth of sounding. The article considers the behavior of non-stationary EMF taking into account the oscillatory processes that occur when the current is turned off in the generator loop. The main research method was mathematical modeling. Two calculation methods were used: 1) based on the presentation of the loop in the form of a set of electric dipole, to follow the line disconnecting during the passage of the straight and back waves of the current along the perimeter of the loop; 2)

calculation a convolution of EMF from the stepped turning off the current with a special type function depending on time. Calculations showed a good coincidence of the results of calculations on both algorithms.

Keywords: induction soundings, current turn-off, transmission line

Введение

В последние два десятилетия потребности малоуглубинной геофизики сделали актуальными измерения переходных характеристик на все более ранних временах. Снижение начального времени регистрации влечет за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле, но на этом пути имеются ограничения как технического, так и принципиального характера [1]. К последним можно отнести тот факт, что на ранних временах (высоких частотах) модель петли, как контура с сосредоточенными параметрами, не может объяснить результаты измерений. Ниже перечислены известные на сегодняшний день экспериментальные результаты, для интерпретации которых необходимо использовать модель петли в виде системы с распределенными параметрами:

- входной импеданс генераторной петли (ГП) зависит от частоты так же, как входной импеданс закороченной на выходе длинной линии;

- после отключения ГП от источника тока, в ней – при отсутствии шунтирующего резистора – возникают затухающие во времени стоячие волны тока и напряжения;

- ток в разных участках провода не выключается синфазно: это происходит с тем большей задержкой, чем дальше удален участок провода от зажимов петли.

Перечисленные результаты свидетельствуют о том, что на ранних временах (высоких частотах) петля в совокупности с подстилающей ее верхней частью разреза (ВЧР) характеризуется свойствами, типичными для длинной линии и подробно изложены в работах [2-7].

Методы исследования

В импульсной индуктивной электроразведке для возбуждения первичного и измерения вторичного полей используют незаземленные горизонтальные петли. Именно они являются основными компонентами измерительных систем, используемых в методах переходных процессов (МПП) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). В процессе измерения переходная характеристика земли сворачивается с переходными характеристиками генераторной и приемной петель. Поэтому при решении прямых и обратных задач импульсной индуктивной электроразведки необходимо учитывать особенности и время выключения тока в генераторной петле и длительность собственного переходного процесса в приёмном контуре, особенно, если его размеры близки к размерам источника. Если размеры приёмной рамки малы, возможно исследование этих процессов только относительно генераторной петли.

Способом, позволяющим «увидеть», что происходит в различных точках провода петли после ее отключения от батареи, является представление процесса

выключения тока в виде суперпозиции волн, распространяющихся в противоположных направлениях в длинной линии, образованной проводом петли и подстилающей ее землей. В момент, когда батарея отключается от зажимов петли, в каждой из двух линий, образующих петлю, возникает отрицательная волна (ступень) тока с амплитудой, равной величине установившегося тока, существовавшего в проводе до отключения петли от источника. Эта волна распространяется от зажима петли к точке симметрии (на удалении полупериметра петли $L/2$). Когда волна достигает средней точки петли (относительно точки отключения питания), которая имеет нулевой потенциал и поэтому может рассматриваться как заземленная, возникает отраженная волна, бегущая от центральной точки к зажиму петли. При этом полный ток в линии представляет сумму установившегося тока и двух волн: первая распространяется от зажима петли к ее центру, вторая – от центральной точки к зажиму. Когда отраженная волна достигнет зажима петли, она вновь отразится, поскольку в этой точке линия провод-ВЧР разомкнута, т.е. нагружена на бесконечное сопротивление. С этого момента распределение тока в проводе равно сумме трех волн и установившегося тока. В дальнейшем произойдут новые отражения, суперпозиция бегущих в обоих направлениях волн приведет к образованию стоячей волны, и процесс выключения тока станет периодическим. В идеальной линии такой процесс мог бы продолжаться неопределенно долго. Реальные линии, к которым относится и система провод-ВЧР, характеризуются потерями, поэтому с течением времени амплитуда стоячей волны убывает [3].

Основным методом данного исследования является математическое моделирование. Рассмотрим установку, обычно используемую при малоглубинных исследованиях методом переходных процессов в виде квадратной генераторной петли – ГП (длина стороны 100 м) и приёмным контуром типа многовиткового индукционного датчика – ПП (длина стороны 1 м). Существенным для исследования являются малые относительно генераторной петли размеры приемной рамки. Это позволяет, без ущерба для общности исследования, изучать переходные процессы, связанные с выключением тока, только в генераторном контуре, а приемник полагать вертикальным магнитным диполем (ВМД) (рис. 1).

Поле индуктивной установки рассчитывается интегрированием полей дипольной установки, когда точечные электрические источники распределены вдоль генераторной, а регистрирующие диполи – вдоль приёмной линий. При аппроксимации приемной рамки вертикальным магнитным диполем выполняется интегрирование только по сторонам генераторного контура, а суммарный результат пересчитывается в точку расположения дипольного приёмника.

Для того, чтобы выполнять моделирование переходных характеристик с учетом процесса выключения тока в генераторной петле как в системе с распределёнными параметрами, необходимо учитывать, что ток выключается в петле не одновременно по всему контуру, а с задержкой, нарастающей от места выключения (0) до точки, равноудаленной от неё на контуре генераторной петли (1), (рис. 1). Этот процесс занимает некоторое время T , в течение которого ток спадает от начального стационарного значения до полного выключения.

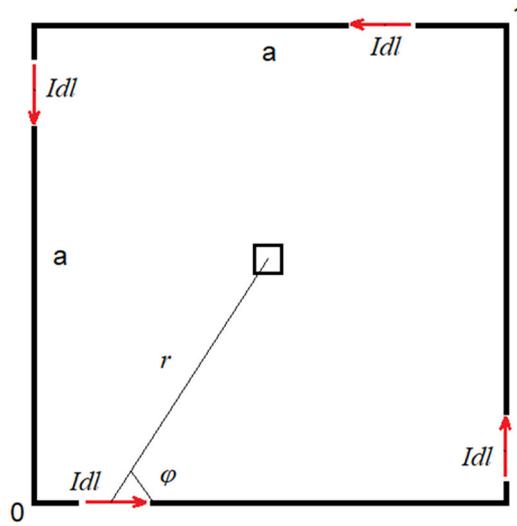


Рис. 1. Представление генераторной петли как совокупности горизонтальных электрических диполей (ГЭД), длина стороны – $a = 100$ м, периметр – $L = 4a$, Idl – моменты ГЭД, составляющих генераторный контур, $\mathbf{p}=(r, \varphi)$ – полярные координаты приемного диполя в системе с центром в диполе-источнике

Далее будем рассматривать генераторную петлю как две линии, соединяющие точки (0) и (1). Каждую из них разобьем на m отрезков и в центр каждого отрезка поместим электрический диполь с моментом Idl , совпадающий по направлению с контуром петли и обходом против часовой стрелки. Временная сетка, с учетом того, что необходимо моделировать выключение диполей по направлению от места разрыва цепи (0) до равноудаленной точки контура (1) и обратно будет содержать $2m$ дискретов, так что $t_m = T/2$ и $t_{2m} = T$. Таким образом, переходный процесс, который будет регистрироваться в приемнике по мере выключения тока, за половину периода можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 E(t_1) &= e(t_1, p_1); \\
 E(t_2) &= e(t_2, p_1) + e(t_1, p_2); \\
 E(t_3) &= e(t_3, p_1) + e(t_2, p_2) + e(t_1, p_3); \\
 E(t_m) &= e(t_m, p_1) + e(t_{m-1}, p_2) + e(t_{m-2}, p_3) + \dots + \\
 &e(t_3, p_{m-2}) + e(t_2, p_{m-1}) + e(t_1, p_m);
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $e(t_i, p_j)$ – поле электрического диполя после выключения ступенчатого импульса в момент t_i , расположенного в точке контура с координатами $p_j = (r_j, \varphi_j)$. При $t=t_m=T/2$, спад тока достигает дальней точки от места выключения (прямая волна). Если есть обратная волна, справедливы следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 E(t_{m+1}) &= e(t_{m+1}, p_1) + e(t_m, p_2) + e(t_{m-1}, p_3) + \dots + \\
 &e(t_4, p_{m-2}) + e(t_3, p_{m-1}) + e(t_2, p_m) + e(t_1, p_m); \\
 E(t_{m+2}) &= e(t_{m+2}, p_1) + e(t_{m+1}, p_2) + e(t_m, p_3) + \dots +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& e(t_5, p_{m-2}) + [e(t_4, p_{m-1}) + e(t_1, p_{m-1})] + [e(t_3, p_m) + e(t_2, p_m)]; \\
& E(t_{m+3}) = e(t_{m+3}, p_1) + e(t_{m+2}, p_2) + e(t_{m+1}, p_3) + \dots + \\
& [e(t_6, p_{m-2}) + e(t_1, p_{m-2})] + [e(t_5, p_{m-1}) + e(t_2, p_{m-1})] + \\
& [e(t_4, p_m) + e(t_3, p_m)]; \\
& E(t_{2m}) = [e(t_{2m}, p_1) + e(t_1, p_1)] + [e(t_{2m-1}, p_2) + e(t_2, p_2)] + \\
& [e(t_{2m-2}, p_3) + e(t_3, p_3)] + \dots + [e(t_{m+5}, p_{m-2}) + e(t_m, p_{m-2})] + \\
& [e(t_{m+2}, p_{m-1}) + e(t_{m-1}, p_{m-1})] + [e(t_{m+1}, p_m) + e(t_m, p_m)]. \quad (2)
\end{aligned}$$

При $t = t_{2m} = T$ ток затухает окончательно в исходной точке, где происходило отключения питания в генераторной петле. На рис. 2 приведены результаты расчетов с помощью программы TurnOff (авторы Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников) переходных ЭДС для проводящего полупространства с удельным сопротивлением 50 Ом·м, установка: ГП – 100×100м², ПП – 1×1м².

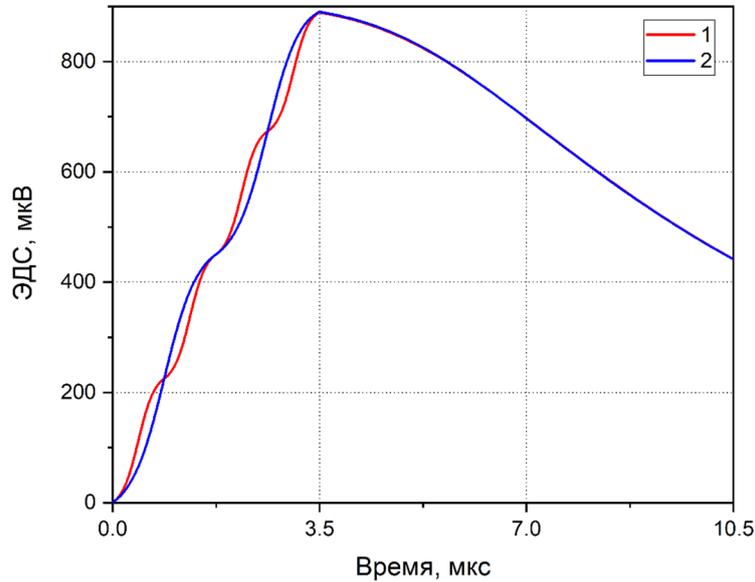


Рис. 2. Переходные эдс при выключении тока в петле с распределёнными параметрами: 1 – прямая и обратная волны при выключении; 2 – только прямая волна (программа TurnOff)

Расчеты выполнялись для случая прямой и обратной волны (формулы 1 и 2, $T=t_{2m}$) и для случая только прямой волны (формула 1, $T=t_m$). Для расчета полей электрических диполей на поверхности проводящего полупространства использовалось известное выражение [8]:

$$e^{L}(t, r, \varphi) = \frac{Idl \sin \varphi}{2\pi \sigma r^4} \left[3 \operatorname{erf}(\theta r) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta r (3 + 2\theta^2 r^2) e^{-\theta^2 r^2} \right], \quad (3)$$

здесь $\theta = \left(\frac{\sigma \mu_0}{4t} \right)^{1/2}$, σ – удельная электропроводность (Сим/м), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума.

Формулы (1-2) наглядны для физического понимания процесса выключения тока в генераторной петле. Однако, учитывая факт, что аналитические выражения полей вида (3) существуют только для простейшей модели полупространства, актуален поиск более экономичного, с вычислительной точки зрения, способа расчета. Очевидно, что если бы мы имели известную эффективную зависимость от времени функции, описывающей затухание тока в петле после выключения, то решение проблемы можно было бы свести к расчету интеграла типа свёртки. Для больших значений хорошим приближением функции тока служит линейный спад: $I_r(t) = 1 - \frac{t}{T}$, где T – время затухания тока после отключения источника питания от генераторной петли. Для малых токов, при которых выполняется регистрация на ранних временах, такое приближение неудовлетворительно. Было сделано предположение, что ток во время выключения может иметь вид «возмущенного» линейного спада (рис. 3):

$$I(t) = I_r(t) + \alpha \sin\left(\beta \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4)$$

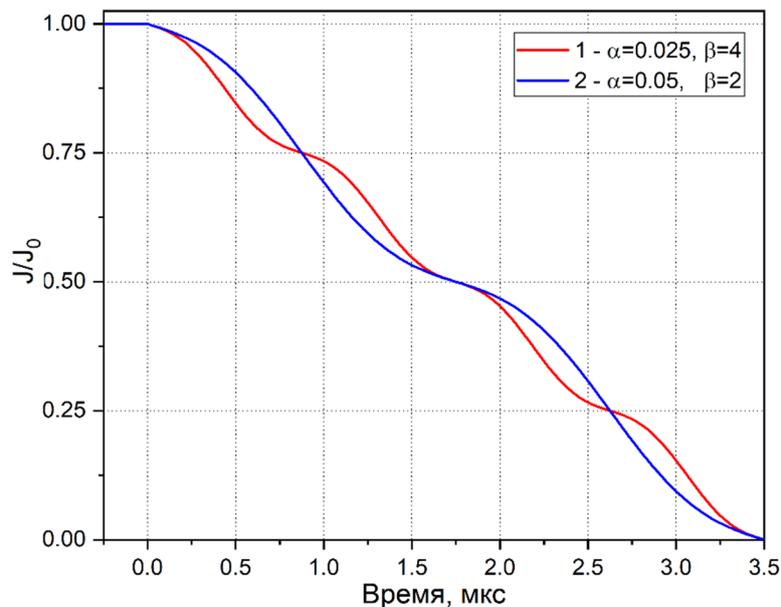


Рис. 3. Графики спада тока: 1-прямая и обратная волны 2-только прямая волна; параметры α и β входят в выражение (4)

Результаты

На рис. 4 представлены результаты сравнительных расчетов переходных характеристик с помощью программ TransOff и QQ_Pls (авторы: Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, М.А. Корсаков, ИНГГ СО РАН). Результаты расчетов показали относительное отклонение менее 0.1%, что говорит о несовпадении лишь за счет разницы способов расчета, и сходимости двух разных программ к одинаковому результату. Программа TansOff рассчитывает отклик среды при последовательном выключении тока в ГП представленном совокупностью ГЭД. Про-

грамма QQ_Pls выполняет расчет свертки функции тока (4) и переходной ЭДС, являющейся реакцией проводящего полупространства при выключении ступени постоянного тока, т.е. когда ГП рассматривается как сосредоточенный источник. Результат свертки показывает, что таким образом возможно моделировать процессы выключения тока, происходящие в распределенном источнике.

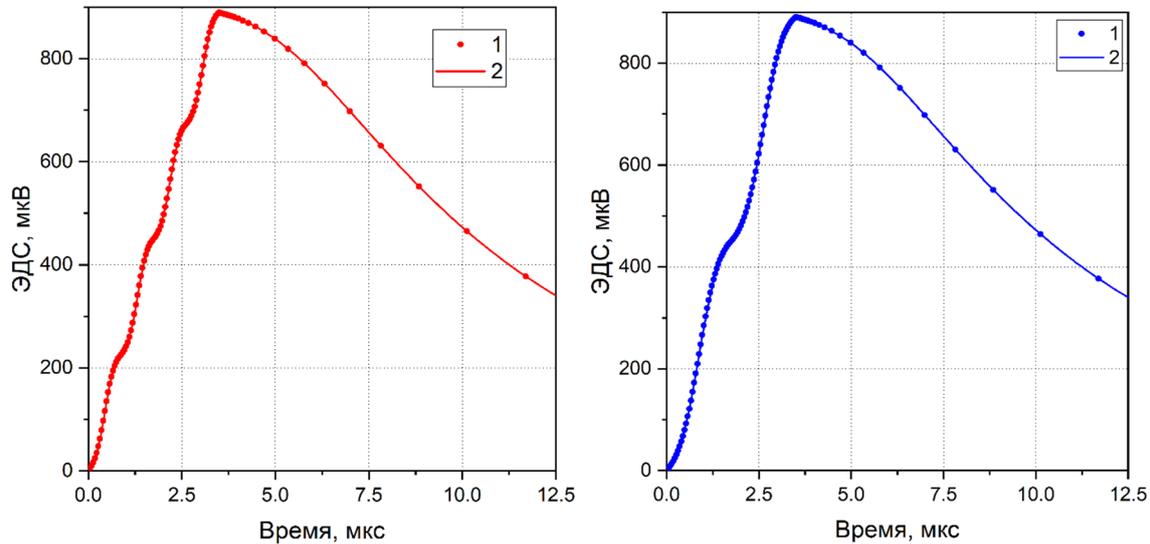


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов с помощью программ TurnOff (1) и QQ_Pls (2)

Заключение

Разработаны программные модули TurnOff и QQ_Pls, реализующие альтернативные алгоритмы для расчета переходных характеристик для распределённого источника возбуждения сред в методе зондирования становлением поля в ближней зоне. Программы предназначены для встраивания в интерпретационную систему TEM-IP [9] для расширения возможностей инверсии данных индукционных импульсных зондирований в нано- и микросекундном интервале времён регистрации.

Средствами численного эксперимента показана идентичность конечного результата работы обоих алгоритмов.

Дальнейшее направление работ должно заключаться в: 1) экспериментальном изучении выключения тока в генераторном контуре, исследовании необходимости и возможностей учёта взаимного влияния всех элементов измерительной установки в микросекундном диапазоне; 2) развитии экономичных способов расчета ранних стадий переходных процессов для использования их при интерпретации малоглубинных импульсных индукционных зондирований.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ FWZZ-2022-0024 «Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плотников А.Е. Оценка ограничений метода переходных процессов при исследовании малых глубин: численный эксперимент // Геология и геофизика. – 2014. – т. 55. – №7. – С. 1144-1152.
2. Кожевников Н.О. Незаземленная горизонтальная петля как система с распределёнными параметрами // Геофизика. – 2006. – № 1. – С. 29-39.
3. Кожевников Н.О. Применение теории длинных линий для исследования собственной переходной характеристики незаземлённой горизонтальной петли // Геология и геофизика. – 2009. – т. 50. – № 3. – С. 300-316.
4. Кожевников Н.О. Выключение тока в горизонтальной незаземлённой петле: теория и эксперимент // Геология и геофизика. – 2016. – т. 57. – № 3. – С. 631-641.
5. Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Distributed EM parameters of an ungrounded horizontal loop and their relation to the near-surface geoelectrical features: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (Chicago, USA), 1998. – EEGS. – P. 1019-1027.
6. Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Early time TEM response of an ungrounded horizontal loop - a new look: 62nd EAGE Conference, Expanded Abstracts (Glasgow), 2000. – D-11.
7. Helwig S.L., Kozhevnikov N.O. Schwingungen in TEM Sendesignalen zu frühen Zeiten // 20 Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein (Hrsg.), 2003, A. Hördt und J.B. Stoll. – P.11-20.
8. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Application, Parts A and B // Ed. Misac N. Nabighian, Society of Exploration Geophysicists: Investigations in Geophysics. – 1991. – No. 3. – Vol. 2. – P. 991.
9. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А., Эпов М.И. Программа для ЭВМ «ТЕМ-IP v2» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668984, 14.10.2022. Заявка № 2022668128/69 от 07.10.2022.

© Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников, М. А. Корсаков, 2023