

Е. Ю. Антонов¹✉, Н. О. Кожевников¹

Моделирование индукционных переходных характеристик с учётом задержки выключения тока в генераторной петле

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

Аннотация. Получение достоверной информации о верхней части геоэлектрического разреза методом переходных процессов, делает необходимыми измерения отклика среды с очень ранних времен. Снижение начального времени регистрации влечёт за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в источнике или контроль этого процесса. Современная аппаратура МПП позволяет производить цифровую регистрацию переходного процесса во время короткого интервала выключения тока, спадающего от стационарного значения до нуля. После отключения коммутатора тока в петле возникают собственные колебания тока. В статье рассматривается поведение нестационарной ЭДС с учётом колебательных процессов, возникающих при выключении тока в генераторной петле. Основным методом исследования было математическое моделирование. Представлены результаты, полученные с помощью программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей, возбуждаемых петлевым источником с распределёнными параметрами. Работа источника во время выключения моделируется представлением генераторного контура набором электрических диполей, последовательно выключающихся в процессе прохождения прямой и обратной волн тока по периметру петли. Выполнен анализ поведения переходной ЭДС на фоне выключения тока и установлена связь поведения ЭДС с геометрией источника.

Ключевые слова: метод переходных процессов, система с распределёнными параметрами, малоглубинные индукционные импульсные зондирования

E. Yu. Antonov¹✉, N. O. Kozhevnikov¹

Modeling induction transient characteristics taking into account the delay in the current shutdown in the transmitter loop

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

Abstract. Obtaining reliable information about the upper part of the ground by transient processes (TEM) makes it necessary to measure the response of the medium as early as possible. A decrease in the initial time of registration entails the need to reduce the duration of turning off the current in the source or control this process. Equipment of the TEM allows digital registration of the transient process during a short turning out to turn off the current, which falls from a stationary value to zero. After disconnecting the current switch in the loop, the current fluctuations arise. The article considers the behavior of non-stationary EMF with the study of the oscillatory processes that occur when the current is turned off in the generator loop. The main research method was mathematical modeling. The results obtained using the program for calculating non-stationary electromagnetic fields excited by a loop source with distributed parameters are presented. The source operation during the shutdown is modeled by the representation of the generator circuit with a set of electric dipole, which are se-

quentially turning off during the passage of the straight and reverse waves of the current along the perimeter of the loop. An analysis of the transient EMF behavior against the background of turning off the current was performed and the connection between the EMF behavior with the geometry of the source was established.

Keywords: transient electromagnetic method, distributed parameters system, near-surface induction impulse soundings

Введение

Основными элементами систем возбуждения-регистрации в методе переходных процессов (МПП) являются незаземлённые горизонтальные генераторные (ГП) и приёмные (ПП) петли. При выключении тока в ГП в окружающем её пространстве возникает вихревое электрическое поле, под действием которого в земле возникают вихревые токи, после чего в отсутствие первичного поля с помощью ПП измеряется переходная ЭДС, индуцированная вторичным магнитным полем. В процессе измерения переходная характеристика земли сворачивается с переходными характеристиками генераторной и приёмной петель [1-2]. Поэтому при решении прямых и обратных задач импульсной индуктивной электроразведки необходимо учитывать особенности выключения тока в генераторной петле и собственный переходный процесс – в приёмной петле. В большинстве случаев при моделировании и экспериментальном изучении собственного отклика незаземлённой петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

В последние годы в связи с большой востребованностью малоглубинной электроразведки актуальны измерения переходных характеристик на всё более ранних временах. Снижение начального времени регистрации влечёт за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле или, по меньшей мере, предполагает, что мы в состоянии контролировать этот процесс. Однако на этом пути имеются ограничения как технического, так и принципиального характера. К числу последних следует отнести тот факт, что на ранних временах и/или высоких частотах петля проявляет себя как система с распределёнными параметрами, характеризующаяся свойствами типичными для длинной линии [3]. Благодаря симметрии петля в совокупности с подстилающей её верхней частью разреза (ВЧР) может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, соединённых последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена.

Основные положения теории применительно к анализу и расчёту выключения тока в горизонтальной незаземлённой петле подробно изложены в публикациях [3-4]. Анализу влияния собственного отклика приёмного контура посвящены работы [5-7]. Влияние конечного времени выключения тока в генераторной петле, формы токового импульса и способы учёта этого влияния рассмотрены в [8-9]. В перечисленных работах для моделирования собственного отклика незаземлённой горизонтальной петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

Процесс выключения тока в системе «петля-подстилаящая среда» зависит от многих факторов, среди которых наиболее важными (определяющими характер поведения тока) являются удельное сопротивление среды, индуктивное взаимодействие между образующими петлю длинными линиями, погонная ёмкость провода. Перечисленные факторы, как правило, неизвестны, либо имеется их приближённая оценка, поэтому при разработке алгоритма, описывающего выключение малого тока в ГП рассматривалась модель, в которой контур представлен в виде набора последовательно выключающихся электрических диполей. Такая модель адекватна процессу выключения источника, и обусловлена только продолжительностью спада тока от стационарного значения до нуля. При этом петля рассматривается как две длинные линии: от места выключения тока до точки, удалённой на длину половины периметра ГП. Отключение происходит в два этапа: на половину амплитуды токовой ступени в направлении к средней точке контура и затем полное выключение в обратном направлении к точке разрыва цепи. Таким образом имитируется прохождение прямой и обратной волн. Это описывает затухание тока в сети с согласованным шунтирующим резистором, который применяется при реальных измерениях. Сопротивление шунта призвано гасить колебательные процессы в линии контура генераторной петли. Существенным для исследования являются малые относительно генераторной петли размеры приёмной рамки (типичная установка мало-глубинных измерений). Это позволяет без ущерба для общности исследования изучать переходные процессы, связанные с выключением тока, только в генераторном контуре.

Для успешного подбора экспериментальных данных на ранних временах идеальной была бы ситуация мгновенного выключения источника. Поскольку по причинам технического характера это невозможно, улучшению качества инверсии данных может способствовать внесение поправки, учитывающей длительность выключения тока в источнике. Поправка осуществляется с помощью коррекции начального (нулевого) времени теоретических либо экспериментальных кривых. Этот приём известен [1] и применяется на практике. Однако, как всякое приближение, он имеет ограничения, поскольку даже точная оценка продолжительности выключения тока в ГП t_0 не позволяет использовать данные для инверсии на временах меньших t_0 . Неважно, при этом, сдвиг применялся к экспериментальным или модельным ЭДС (рис. 1а). Способом, позволяющим избежать это ограничение, является учёт продолжительности токового спада в решении прямой задачи. При этом предполагается, что ток после отключения коммутатора затухает по линейному закону:

$$I_r(t) = I_0(1 - t/t_0), 0 < t \leq t_0, \quad (1)$$

где I_0 – величина силы тока пропускания; t_0 – продолжительность затухания тока в петле после отключения источника питания.

Решением прямой задачи является свёртка ЭДС мгновенного выключения бесконечной ступени тока – E_s и функции спада – $I_r(t)$ (1), а результат соответ-

стует ситуации сосредоточенного типа источника. Такие вычисления ЭДС более точны по сравнению с использованием временной поправки, и позволяют выполнять инверсию с момента полного выключения тока в ГП, а отличия E_s и E_r подчеркивают необходимость использования E_r при инверсии (рис. 1а).

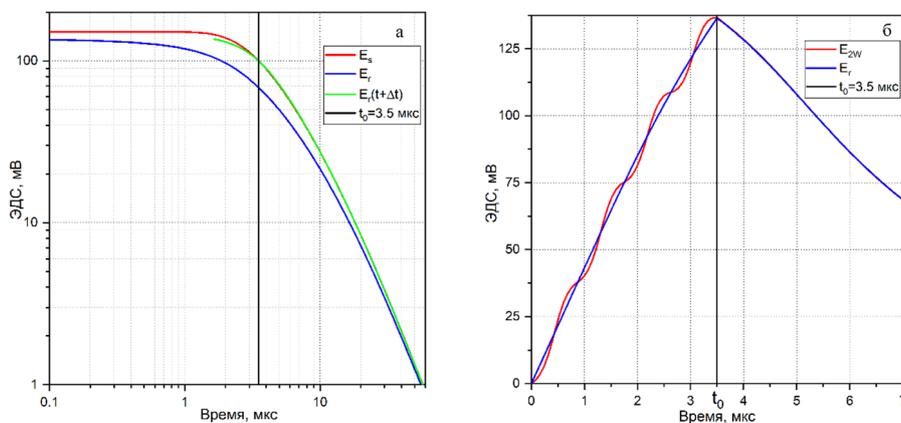


Рис. 1. Расчётные ЭДС: (а) E_s – выключение ступени тока, E_r – выключение с линейным спадом продолжительностью 3.5 мкс; $E_r(t + \Delta t)$ – скорректированная кривая с положительным сдвигом по времени на 1.6 мкс; (б) – ЭДС, индуцированная источником с распределёнными E_w и сосредоточенными E_r параметрами на фоне тока $0 < t < t_0$ и после выключения $t > t_0$.

В настоящее время, измерение ЭДС на фоне токового спада (рис. 1б) используется лишь для определения его (спада) продолжительности t_0 . При этом, для нахождения времени t_0 определяется максимальное значение ЭДС на интервале роста после разрыва цепи в источнике. Этот момент считается окончанием токового спада и с него начинается нулевой отсчёт времени для режима становления. Это всегда верно для систем с сосредоточенными параметрами, это почти точно для ситуации больших токов, выключаемых по линейному закону, это хорошее приближение при зондировании низкоомных сред соосными установками, но этого недостаточно для определения длительности выключения на малых токах. Поскольку многие системы первичной подготовки данных (сборки ЭДС для инверсии) основаны на сшивке полной ЭДС, начиная с ЭДС на малом токе исследование этого вопроса представляется актуальным.

Кроме сказанного выше, измерения на фоне тока содержат больше полезной информации, чем используется сейчас, и целью данного исследования является изучение возможностей её извлечения и использования. Для этого за предшествующие несколько лет был выполнен ряд полевых и численных экспериментов [10], направленных на изучение поведения переходных характеристик (ПХ) на ранних временах регистрации, начиная с момента выключения тока в ГП.

Одной из первых особенностей, обратившей на себя внимание, стал колебательный характер поведения ПХ после отключения тока, который в разной сте-

пени заметен на многих результатах измерений. Результаты расчётов ПХ для проводящего однородного полупространства [11] не столько прояснили, сколько озадачили. Получалось, что измерения, правильно согласованной со средой, соосной установкой должны выглядеть на фоне выключающегося тока строго однообразно и демонстрировать на восходящей ЭДС наложенные четыре периода колебаний синусоидального типа (рис. 1б). Поскольку современные малоглубинные исследования и уровень аппаратуры позволил накопить достаточно материала (рис. 2), стало ясно, что в совершенствовании нуждаются средства математического моделирования. Данная статья посвящена первым результатам в этом направлении.

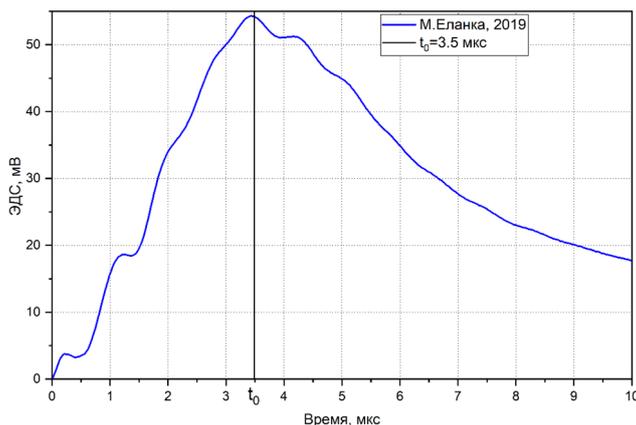


Рис. 2. Колебательный характер переходной ЭДС на малых токах: генераторная петля 100×100 м, соосный приёмный контур 10×10 м

Методы и материалы

Основным методом данного исследования является численное моделирование. Первые расчёты ЭДС для случая источника с распределёнными параметрами над проводящим однородным полупространством (программа TurnOff) были приведены в [11]. Возможности для математического моделирования были расширены благодаря компьютерной программе (QqDistrTrans) для расчёта переходных характеристик горизонтально-слоистых сред в методе импульсных индукционных зондирований. Программа допускает задание произвольной геометрической формы как для генераторной (ГП), так и приёмной (ПП) петель. Координаты контуров могут быть расчётными (прямоугольник, окружность), или считываемыми из внешних файлов, содержащих соответствующие треки.

Результаты

В данной работе рассмотрена, часто используемая, при малоглубинных исследованиях установка, состоящая из квадратных ГП – 100×100 м и ПП – 10×10 м. На рис. 2 представлены результаты измерений в окрестностях д. Малая Еланка Иркутской области. Вертикальной линией отмечен момент времени, соответствующий полному затуханию тока в ГП. Данные измерений были количественно инвертированы с помощью системы (ТЕМ-IP, [12]) и в результате была получена геоэлектрическая модель (табл. 1).

Геоэлектрическая модель

№	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$h, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	$S, \text{ См/м}$	$S_{\square}, \text{ См/м}$
1	82.3	18.4	18.4	0.2	0.2
2	51.8	39.2	57.6	0.8	1
3	39.6	96.7	154	2.4	3.4
4	31.1	173	328	5.6	9
5	77.2				

Далее в статье все расчётные примеры выполнялись для модели из табл. 1. Результаты расчётов, приведённые на рис. 3, объясняют причину колебательного поведения ЭДС на фоне выключающегося малого тока в ГП. На рис. 3а приведены результаты расчётов для квадратной и эквивалентной ей по площади круговой ГП. Переходная ЭДС, индуцированная квадратной петлей, демонстрирует колебательный характер из-за того, что элементы контура петли находятся на разном удалении от ПП и при последовательном выключении разные участки контура вносят вклады в суммарный отклик, отличающиеся по амплитуде.

В случае кругового контура все его элементы равноудалены от центра ГП и в результате ЭДС кругового источника (при выключении с запаздыванием) идентичен результату с выключением по линейному закону. Отсюда следует, что «волновое» поведение сигналов определяется геометрией ГП. Для подтверждения этого вывода были выполнены дополнительные расчёты для прямоугольных контуров с площадями равными площади квадратной: ГП1 – (200×25 м) и ГП2 – (150×66.7 м) (рис. 3б).

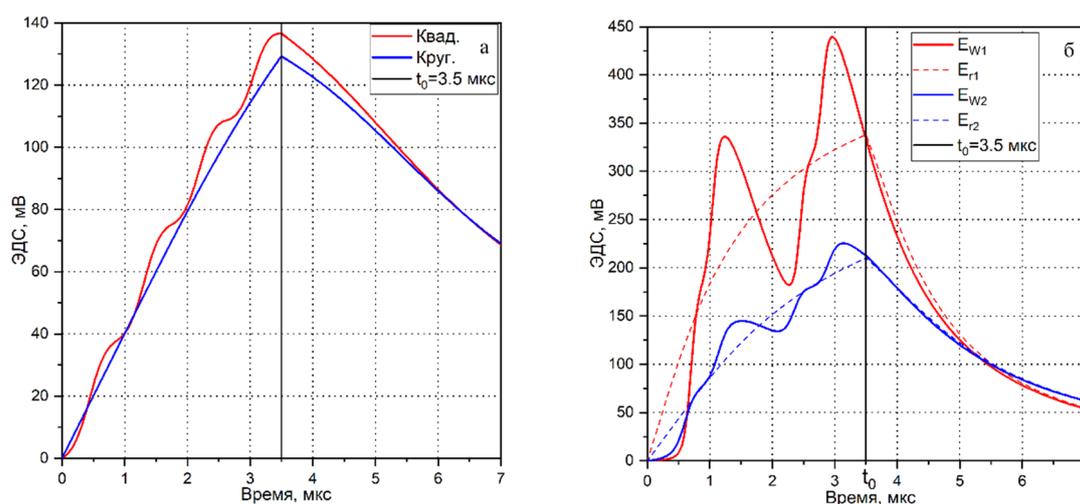


Рис. 3. Расчётные ЭДС для соосных установок ПП 10×10 м: (а) ГП – квадратная (100×100 м) и эквивалентная по площади круговая; (б) – ЭДС, индуцированное прямоугольными ГП: E_{w1} – (200×25 м), E_{w2} – (150×66.7 м) – выключение тока с запаздыванием, E_{r1} , E_{r2} – линейное выключение тока

Из рис. 3б, на котором показаны ЭДС для выключения с запаздыванием и по линейному закону (1), видно, что только за счёт изменения геометрии генераторных петель можно добиться сильных изменений в характере колебаний ЭДС на интервале затухания тока в ГП. Кроме изменений в амплитуде колебаний ЭДС происходит смещение по времени экстремальных точек ЭДС относительно истинного момента выключения тока 3.5 мкс. Для рассмотренной модели, это смещение составляет 0.5 мкс (14% от общей продолжительности интервала затухания тока). Отсюда можно сделать вывод о практическом значении модельных вычислений ЭДС на фоне выключения малых токов, которые позволяют точнее определять момент полного отключения источника, что повышает точность инверсии данных зондирования на ранних временах.

Заключение

Основной задачей исследования была разработка средств программного обеспечения для моделирования переходных характеристик с распределённым источником произвольной геометрической формы, начиная с момента выключения тока в источнике и с учётом позиции точки выключения.

В результате проведённого моделирования можно сделать следующие выводы:

- поведение ЭДС на ранних временах регистрации во время выключения тока в источнике зависит от геометрии источника и положения точки измерения относительно точки выключения тока;

- выполнены сравнительные расчёты для квадратного и кругового источников для объяснения колебательного характера поведения переходных характеристик в процессе выключения прямоугольной генераторной петли.

Основным направлением дальнейших исследований предполагается выполнение полевого эксперимента для проверки выводов, сделанных на основе математического моделирования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований ФНИ FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «ЦИКЛ». – Новосибирск, СНИИГГиМС, 1981. – 99 с.
2. Asten M.W. Full transmitter waveform transient electromagnetic modeling and inversion for soundings over coal measures // Geophysics. – 1987. – Vol. 52. – № 3. – P. 279-288.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределёнными параметрами: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 152 с.
4. Кожевников Н.О. Выключение тока в горизонтальной незаземлённой петле: теория и эксперимент // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 3. – С. 631-641.
5. Вишняков А.Э., Вишнякова К.А. Возбуждение и измерение полей в электроразведке. – Л.: Недра, 1974. – 129 с.

6. Ефимов Ф.Д. Переходный процесс приемной рамки и его влияние на результаты наблюдений в дипольном варианте МПП // Методы разведочной геофизики. Электроразведка, НПО «Геофизика». – 1976. – Вып. 26. – С. 72-79.
7. Yu C., Fu Z., Zhang H., Tai H.-M., Zhu X. Transient process and optimal design of receiver coil for small-loop transient electromagnetics // Geophysical Prospecting. – 2014. – Vol. 62. – № 2. – P. 377-384.
8. Raiche A.P. The effect of ramp function turn-off on the TEM response of layered earth // Exploration Geophysics. – 1984. – Vol. 15. – № 1. – P. 37-41.
9. Fitterman D.V., Anderson W.L. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings // Geophysical Prospecting. – 1987. – Vol. 24. – P. 131-146.
10. Kozhevnikov N., Sharlov M., Pesturin T., Antonov E. Testing transient electromagnetics systems on the ice cover of Lake Baikal // Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 212. – P. 104985.
11. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Сравнение двух способов расчёта ранней стадии переходных процессов в методе импульсных индукционных зондирований // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 2. – № 3. – С. 18-25.
12. 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, 2025