

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПЕТЛЕ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Н.О. Кожевников

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Оценка возможностей системы для зондирования методом переходных процессов должна включать измерения в поле с использованием моделей, по размерам сопоставимым с генераторно-приемной установкой и изучаемыми геологическими объектами. В качестве такой модели удобно использовать горизонтальную петлю, нагруженную на известное сопротивление. Ее достоинствами являются простота раскладки на местности, возможность контролировать параметры и рассчитать собственную переходную характеристику. Средствами полевого эксперимента и компьютерного моделирования изучено влияние вихревых токов, устанавливающихся в однородном проводящем полупространстве, на переходный процесс тока в нагруженном на резистор проволочном контуре. Это влияние проявляется как на ранних, так и на поздних временах регистрации переходного процесса. Чем выше удельное сопротивление земли, тем при прочих равных условиях шире временной диапазон, в пределах которого измеренная переходная характеристика совпадает с рассчитанной для непроводящей земли. В результате выполненных исследований показано, что использование нагруженной на резистор петли-модели, расположенной вблизи генераторно-приемной установки, позволяет оценивать реальные возможности системы для проведения электроразведочных работ методом переходных процессов или его аналогов; измерение тока в контуре-модели может быть использовано для оценки удельного сопротивления земли; замкнутая петля-модель снижает скорость нарастания и амплитуду начального воздействия на измерительную петлю или индукционный датчик.

Импульсная индуктивная электроразведка, переходный процесс, горизонтальная незаземленная петля, модель.

TESTING TEM SYSTEMS USING A LARGE HORIZONTAL LOOP CONDUCTOR

N.O. Kozhevnikov

Testing TEM systems has to include field experiments with physical models commensurate to the real transmitter–receiver configurations and to the target subsurface features. A large horizontal loop closed across a known resistance is a convenient model in this respect. It is convenient to lay in the field, it has manageable parameters, and its natural response is easy to calculate.

A field-size experiment and numerical modeling were applied to investigate the model wire loop response to eddy current in a uniform conductive ground, both at early and late times. The higher the resistivity of the ground, the larger the time range in which the measured response matches the predicted one, other things being equal.

The experiments show that (i) closed loops laid near a transmitter–receiver system are applicable to test the quality of the latter as a tool for TEM or other similar resistivity surveys; (ii) current induced in the model loop can be used to infer the resistivity of the ground; (iii) a closed loop slows down the growth and reduces the amplitude of voltage induced at early times in a receiver loop or in a multiturn coil.

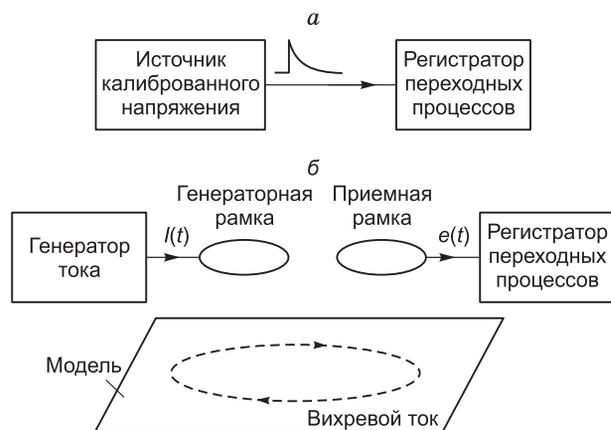
TEM surveys, ungrounded horizontal loop, physical model

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве случаев проверку электроразведочной аппаратуры производят путем измерения сигнала с контролируемыми параметрами. Чаще всего — это напряжение, создаваемое эталонным источником. В импульсной индуктивной электроразведке для проверки аппаратуры используется сигнал специальной формы в виде убывающей во времени ЭДС, которая поступает на вход измерителя переходных процессов (рис. 1, а). Формирование такого сигнала осуществляется в аналоговой форме, например с помощью RC-цепи, или сначала в цифровой форме с последующим преобразованием в аналоговую. При этом оценивается качество лишь измерительного блока аппаратуры.

Рис. 1. Схема тестирования:

a — измерителя переходных процессов с помощью источника эталонной ЭДС; *б* — генераторно-измерительного тракта аппаратуры путем возбуждения и измерения переходного процесса в аналоговой модели.



Распространенным способом создания эталонного сигнала является физическое моделирование [Захаркин, Тарло, 1999]. В этом случае используется ЭДС переходного процесса, наводящаяся в приемной рамке вихревыми токами, возникающими в модели после выключения тока в генераторной рамке (см. рис. 1, б). Как правило, размеры модели и самих рамок не превышают долей метра. Одним

из достоинств физического моделирования является то, что с учетом критериев подобия оно позволяет получить представление о переходных процессах, которые могут наблюдаться в присутствии реальных геологических сред/объектов. Другое преимущество данного способа заключается в том, что с его помощью оцениваются параметры всей генераторно-измерительной системы, а не только измерителя.

Такая методика соответствует представлению системы для нестационарных электромагнитных зондирований (НЭМЗ) в виде последовательно соединенных четырехполюсников. Система включает аппаратуру для возбуждения и регистрации переходных процессов, генераторную и приемную петли, линию/канал синхронизации или кондуктор, источники питания, транспорт и зондируемую среду. Обычно указанные компоненты рассматривают как линейные четырехполюсники с сосредоточенными параметрами [Вишняков, Вишнякова, 1974; Захаркин, 1981]. Полагают также, что параметры четырехполюсников взаимно независимы и постоянны во времени. В области теории такое представление соответствует линеаризации реальной системы, принятию гипотез об ее стационарности и отсутствии в ней перекрестных связей. В прикладном плане оно обосновывает подход, при котором аппаратуру, методику полевых работ и приемы интерпретации переходных характеристик разрабатывают слабосвязанные между собой группы специалистов, обычно без учета взаимодействия отдельных компонентов системы НЭМЗ.

Предположим, что в лабораторных условиях с помощью проверяемой аппаратуры удалось измерить эталонные переходные процессы с необходимой точностью. Можно ли после этого гарантировать, что столь же хорошие результаты будут получены в поле? Есть основания полагать, что в общем случае без дополнительных исследований дать утвердительный ответ на этот вопрос не представляется возможным.

Как известно [Kozhevnikov, Nikiforov, 2000; Кожевников, 2006, 2009], генераторная и приемная петли и аппаратура в совокупности с подстилающей их верхней частью геологического разреза (ВЧР) образуют систему с распределенными параметрами, компоненты которой взаимодействуют друг с другом. На результаты измерений влияют геоэлектрическое строение ВЧР, температура, метеоусловия, электромагнитные помехи и другие факторы. Под воздействием значительных импульсных перенапряжений, возникающих в результате прерывания тока в генераторной петле, в регистраторе и приемной петле возникают собственные переходные процессы. Многие из связей между элементами системы проявляются по-разному в лабораторных и полевых условиях. В значительной мере перечисленные проблемы проистекают из пробелов в теории подобия электромагнитных систем. Известные на сегодняшний день критерии подобия, связывающие данные лабораторных и полевых наблюдений, не учитывают специфики генераторно-приемной установки как сложной системы с распределенными параметрами. Необходимо подчеркнуть роль геологической среды (особенно ее верхней части), объединяющей элементы установки в единую систему с качествами, не сводимыми к простой сумме качеств отдельных элементов.

Известные способы проверки аппаратуры для метода переходных процессов ориентированы на то, чтобы оценить качество измерительного и генераторного блоков аппаратуры как таковых, без учета специфики реальной системы НЭМЗ. При этом предполагается, что метрологические характеристики системы определяются преимущественно параметрами измерителя переходных процессов. Однако с учетом сказанного выше по поводу особенностей системы для реализации измерений методом переходных процессов ясно, что полноценная методика проверки должна быть ориентирована на оценку качества не отдельных блоков аппаратуры, а всей системы в целом. Необходимо стремиться к тому, чтобы тестирование системы осуществлялось также и в условиях полевого эксперимента, а затем можно было бы оценить ее с учетом всех факторов, которые могут повлиять на процесс измерений. Подобная оценка не может быть выполнена в лаборатории, когда источником калибровочного сигнала является электронная схема или маленькая рамка в присутствии небольшой модели.

Известные методы оценки качества измерений не учитывают собственные переходные процессы в системе зондирующая установка—геологическая среда. Эти способы проверки измерительных систем для импульсной индуктивной электроразведки применимы в тех случаях, когда ЭДС полезного сигнала намного превышает создаваемую за счет собственных переходных процессов измерительной системы (высокая электропроводность геологической среды, большие установки). Однако они не обеспечивают правильную оценку возможностей системы в условиях высокоомных сред и/или при работе с установками малого размера, а также при измерениях на ранних временах.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

В известной работе [Grant, West, 1965] в общем виде рассмотрено взаимодействие генераторно-приемной установки с моделью в виде замкнутого контура, в качестве которого можно использовать и разложенную на поверхности земли петлю из изолированного провода. Такая петля представляет собой модель проводника, по размерам сопоставимую с реальными геологическими объектами и генераторно-приемной установкой НЭМЗ. Примеры применения разложенной на поверхности земли большой петли с целью калибровки и оценки параметров систем для аэроэлектроразведки методом переходных процессов описаны в статьях [Davis, Macnae, 2008a,b]. Очевидно, горизонтальная незаземленная петля может и должна найти применение в качестве модели проводника и при тестировании наземных измерительных систем для нестационарных индукционных зондирований. При этом особенно важно, что в данном случае в системе возникают такие же собственные переходные процессы, как и при проведении обычных полевых измерений. Это гарантирует проявление тех ограничений, которые могут быть не выявлены и, соответственно, оценены путем использования описанных выше «мягких» способов проверки. Результаты, представленные в упомянутых выше работах [Davis, Macnae, 2008a,b], получены в районах с высоким (10^3 Ом·м) удельным сопротивлением горных пород, благодаря чему влияние земли по сравнению с откликом петли было незначительным. Однако при тестировании системы в менее благоприятных условиях, т.е. когда удельное электрическое сопротивление геологической среды не обязательно высокое, важно уметь определять временной диапазон, в котором влияние проводящей земли остается приемлемым.

Общая схема измерений с целью оценки возможностей реальной системы для индукционных нестационарных зондирований в натуральных условиях показана на рис. 2. Кроме генераторной 1 и приемной 3 петель на местности раскладывается петля-модель 2. К ее зажимам подключено сопротивление Z , оно может быть комплексным и частотно-зависимым. В простейшем и практически наиболее интересном случае это обычный резистор с сопротивлением R . На рис. 2 изображена установка с разнесенными квадратными петлями, однако в принципе их форма и взаимное положение могут быть произвольными.

Каждая из показанных на рис. 2 петель индуктивно связана с другими. Эта связь характеризуется коэффициентами взаимной индукции M_{12} между генераторной петлей и моделью, M_{23} — между моделью и приемной петлей, M_{13} — между генераторной и приемной петлями.

Предположим, что в генераторной петле в течение достаточно длительного времени протекал установившийся ток $I_1 = I_0$. В момент времени $t = 0$ начинается выключение тока, которое происходит по линейному закону. Согласно принятой терминологии, процесс выключения тока характеризуется длительностью среза $t_{\text{ср}}$ (рис. 3, а). Чем меньше $t_{\text{ср}}$, тем менее инерционна генераторная петля, и тем ближе временная зависимость тока в ней к ступенчатой функции вида $I_1(t) = [1 - \sigma(t)]I_0$, где $\sigma(t)$ — единичная функция Хевисайда.

Если удельное электрическое сопротивление ρ земли велико, вихревые токи в ней быстро затухают и не оказывают ощутимого влияния на переходный процесс тока I_2 в модели. Ток в генераторной петле создает синфазное с ним первичное магнитное поле B_1 , которое до момента $t = 0$ остается постоянным, затем в течение времени $t_{\text{ср}}$ линейно убывает, после чего становится равным нулю и остается таким до включения следующего токового импульса (см. рис. 3, а, процесс включения тока не показан). Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея линейно убывающее первичное магнитное поле по-

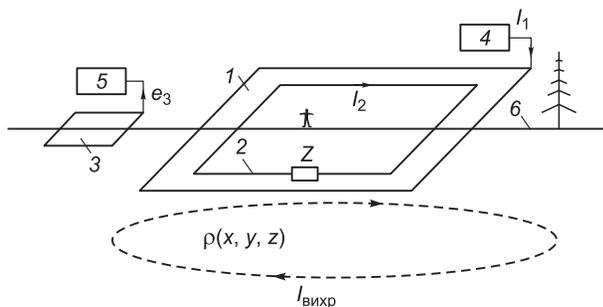
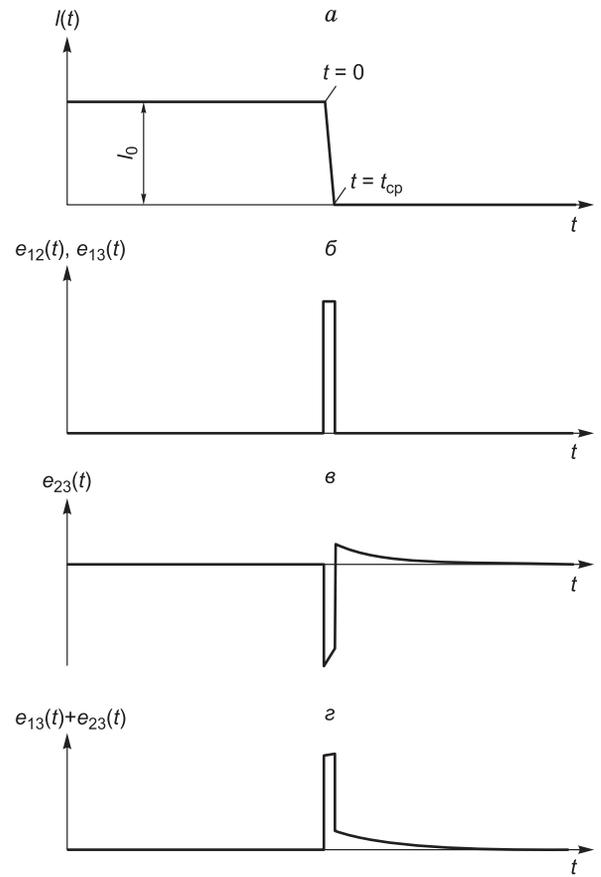


Рис. 2. Оценка системы для импульсной индуктивной электроразведки.

1 — генераторная петля; 2 — контур-модель, нагруженный на внешнюю цепь с импедансом Z ; 3 — приемная петля; 4 — генератор импульсов тока; 5 — измеритель; 6 — поверхность земли; e_3 — ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет переходных процессов в земле и модели.

Рис. 3. Графики тока и ЭДС в разных элементах генераторно-измерительной установки.

a — ток в генераторной петле; *б* — ЭДС $e_{12}(t)$ и $e_{13}(t)$, наводимые в контуре-модели и приемной петле во время выключения тока в генераторной петле; *в* — ЭДС $e_{23}(t)$, индуцируемая в приемной петле за счет тока в модели; *г* — суммарная ЭДС в приемной петле. Приведенные графики иллюстрируют форму тока и ЭДС в различных элементах системы без учета масштаба.



рождает в окружающем генераторную петлю пространстве вихревое электрическое поле E_1 , зависимость последнего от времени имеет вид прямоугольного импульса длительностью t_{cp} . Интеграл от касательной составляющей E_1 по произвольному замкнутому контуру дает ЭДС, действующую в данном контуре. ЭДС $e_{12}(t)$, наводящаяся в контуре-модели, существует в течение промежутка времени t_{cp} и равна

$$e_{12}(t) = -M_{12} \frac{dI_1}{dt} = M_{12} \frac{I_0}{t_{cp}}, \quad 0 < t \leq t_{cp}; \quad (1a)$$

$$e_{12}(t) = 0, \quad t > t_{cp}. \quad (1б)$$

График $e_{12}(t)$ показан на рис. 3, б. Если $t_{cp} \rightarrow 0$, т. е. выключение тока в генераторной петле происходит мгновенно (практически это означает, что $t_{cp} \ll \tau$, где τ — постоянная времени модели), то

$$e_{12}(t) = M_{12} I_0 \delta(t),$$

где $\delta(t)$ — дельта-функция.

Элементарные выкладки показывают, что электрический ток $I_2(t)$, возникающий в контуре-модели под действием ЭДС e_{12} (см. выражения (1a), (1б), рис. 3, б), сначала нарастает, а потом убывает:

$$I_2(t) = \frac{M_{12} I_0}{t_{cp} R_m} \cdot [1 - e^{-t/\tau}] \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_{cp}, \quad (2a)$$

$$I_2(t) = \frac{M_{12} I_0}{t_{cp} R_m} \cdot e^{-t/\tau} [e^{t_{cp}/\tau} - 1] \quad \text{при } t > t_{cp}. \quad (2б)$$

Здесь R_m — активное сопротивление модели, включающее сопротивление R_{Π} провода петли и сопротивление подключенного к нему резистора R :

$$R_m = R_{\Pi} + R, \quad (3)$$

а постоянная времени τ определяется выражением

$$\tau = L / R_m, \quad (4)$$

где L — собственная индуктивность петли, используемой в качестве модели.

Протекающий в контуре-модели ток I_2 создает переменное магнитное поле, индуцирующее в приемной петле ЭДС $e_{23}(t)$. Приведенная к току в генераторной петле эта ЭДС (см. рис. 3, в) определяется выражениями:

$$\frac{e_{23}(t)}{I_0} = -\frac{M_{12} M_{23}}{L} \frac{1}{t_{cp}} e^{-t/\tau}, \quad 0 < t \leq t_{cp}; \quad (5a)$$

$$\frac{e_{23}(t)}{I_0} = \frac{M_{12}M_{23}}{L} \frac{1}{t_{cp}} e^{-t/\tau} (1 - e^{t_{cp}/\tau}), \quad t > t_{cp}. \quad (56)$$

Если $t_{cp} \rightarrow 0$, т.е. выключение тока в генераторной петле происходит мгновенно, то выражения (5а) и (5б) можно объединить в одно, описывающее импульсную (по другой терминологии переходную) характеристику $h(t)$ модели:

$$h(t) = \frac{M_{12}M_{23}}{L} \left[-\delta(t) + \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \right]. \quad (6)$$

Сложив $e_{13}(t)/I_0$ и $e_{23}(t)/I_0$, получим суммарную приведенную к току ЭДС $e_3(t)/I_0$, индуцируемую в приемной петле как за счет прямого воздействия генераторной петли, так и тока в контуре-модели (см. рис. 3, з):

$$\frac{e_3(t)}{I_0} = \frac{1}{t_{cp}} \left(M_{13} - \frac{M_{12}M_{23}}{L} e^{-t/\tau} \right), \quad 0 < t \leq t_{cp}; \quad (7а)$$

$$\frac{e_3(t)}{I_0} = \frac{1}{t_{cp}} \frac{M_{12}M_{23}}{L} (1 - e^{-t_{cp}/\tau}) e^{-t/\tau}, \quad t > t_{cp}. \quad (7б)$$

Переход к пределу при $t_{cp} \rightarrow 0$ в (7б) даст $e_3(t)/I_0$ при мгновенном выключении тока в генераторной петле:

$$\frac{e_3(t)}{I_0} = \left(M_{13} - \frac{M_{12}M_{23}}{L} \right) \delta(t) + \frac{1}{\tau} \frac{M_{12}M_{23}}{L} e^{-t/\tau}. \quad (8)$$

Приведенные выше формулы получены в предположении, что генераторная и приемная петли, а также контур-модель расположены на поверхности непроводящей среды. Только в этом случае ЭДС, измеряемая на временах $t \geq t_{cp}$, т.е. после выключения тока в генераторной петле (см. выражение (7б)), определяется параметрами исключительно контура-модели. В дальнейшем эта ЭДС будет обозначаться как $e_m(t)$. Кроме того, после сделанных выше пояснений (см. рис. 3), в последующем изложении для определения величины тока в генераторной петле вместо I_0 будет использоваться обозначение I .

В процессе эксперимента I может изменяться в зависимости от параметров батарей, аккумуляторов или генератора, используемых для создания тока в генераторной петле. Для того чтобы результаты измерений были сопоставимы, необходимо ЭДС переходного процесса нормировать на ток в генераторной петле, при котором измерена эта ЭДС. В выражениях, приведенных ниже, ЭДС записана в нормированном виде, например, $e_m(t)/I$ и т.п. Хотя при этом ток в генераторной петле всегда обозначается как I , для каждого конкретного измерения он может не быть одинаковым.

В реальных условиях петли находятся на поверхности проводящей геологической среды, поэтому при выключении тока в генераторной петле переходный процесс возникает не только в петле-модели, но и в подстилающем установку полупространстве. Поэтому воздействие, которому подвергается контур-модель, зависит не только от параметров трех петель, но и от устанавливающихся в земле вихревых токов. Обозначим нормированную на ток ЭДС, индуцируемую в приемной петле за счет переходного процесса в земле, как $e_g(t)/I$. ЭДС, индуцируемую в приемной петле переходным процессом тока в модели с учетом влияния, которое на этот переходный процесс оказывает земля, обозначим $e_{mg}(t)/I$.

Очевидно, переходный процесс $e_{g+m}(t)/I$ в системе земля + модель можно записать в виде суммы $e_{g+m}(t)/I = e_g(t)/I + e_{mg}(t)/I$, откуда следует, что

$$e_{mg}(t)/I = e_{g+m}(t)/I - e_g(t)/I. \quad (9)$$

В отличие от $e_m(t)/I$, в общем случае $e_{mg}(t)/I$ не может быть рассчитана без учета влияния земли. Поэтому важно выяснить, возможно ли (и если да, то при каких параметрах модели, установки и земли) так организовать измерения, чтобы $e_{mg}(t)/I$ практически не отличалась от $e_m(t)/I$.

Если возможно определить такие условия, то имеются основания рекомендовать (хотя и для ограниченного временного диапазона) простую методику оценки качества измерительной системы. Сначала при разомкнутом контуре-модели измеряется ЭДС $e_g(t)/I$, индуцируемая в приемной петле токами в земле. Затем контур-модель закорачивается с помощью резистора, после чего измеряется переходная характеристика $e_{g+m}(t)/I$ системы земля + модель. Для нахождения ЭДС $e_m(t)/I$ из переходной характеристики системы земля + модель вычитается переходная характеристика земли:

$$e_m(t)/I = e_{g+m}(t)/I - e_g(t)/I. \quad (10)$$

Рис. 4. Собственные, т.е. при отсутствии взаимного влияния, переходные характеристики геологической среды и модели.

Наконец, найденный таким образом сигнал сравнивается с рассчитанным по формуле (76). Мерой качества измерений является отклонение измеренной ЭДС от расчетной.

Случай, когда можно пренебречь влиянием геологической среды на переходный процесс в модели, иллюстрирует рис. 4, где показаны гипотетические переходные характеристики однородного проводящего полупространства и контура-модели. В поздней стадии ЭДС, наводимая в приемной петле за счет затухания вихревых токов в однородном проводящем полупространстве, описывается степенной функцией [Сидоров, 1985; Spies, Frischknecht, 1991]:

$$e_n(t)/I = a \cdot t^{-5/2}, \quad (11)$$

где a — не зависящий от времени коэффициент, учитывающий геометрию установки и электропроводность подстилающей среды. Напряжение, индуцируемое в измерительной петле за счет затухания тока в контуре-модели, представляет собой экспоненту

$$e_m(t)/I = b \cdot \exp(-t/\tau), \quad (12)$$

где τ — постоянная времени контура-модели, b — не зависящий от времени коэффициент (см. формулу (76)).

В двойном логарифмическом масштабе график степенной функции представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом $-5/2$. Экспоненциальная функция, показанная в том же масштабе, выглядит как выпуклая кривая, крутизна которой с течением времени возрастает. Выбором параметров M_{12} , M_{23} , L и τ можно добиться, чтобы во временном окне $t_1 - t_2$ ЭДС, наводимая в приемной петле за счет переходного процесса в модели не менее чем в заданное количество раз (на рис. 4 в десять и более), превосходила ЭДС, наводимую за счет становления вихревых токов в земле. Таким образом, в диапазоне $t_1 - t_2$ измеряемый сигнал с заданной погрешностью определяется параметрами контура-модели. Параметры модели, непосредственно контролируемые экспериментатором, а также те, на которые оказывается опосредованное влияние, перечислены в таблице. Эти параметры входят в выражения (2)–(8), описывающие реакцию модели на выключение тока в генераторной петле.

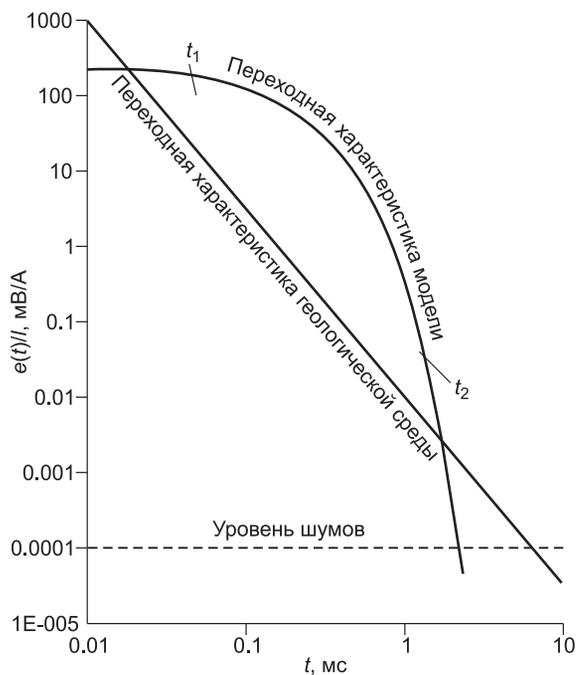
Горизонтальная линия (см. рис. 4) показывает уровень шумов, определяющийся свойствами измерительной системы и внешними помехами. С течением времени для экспоненциальной модели ухудшение соотношения сигнал/помеха происходит быстрее, чем для сигнала от проводящего полупространства.

ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для того чтобы выяснить, выполняется ли применительно к рассматриваемой системе принцип суперпозиции, и если да, в каком временном диапазоне, на полигонах в окрестностях г. Мирный в Западной Якутии были выполнены специальные полевые эксперименты. Использовались установки с совмещенными петлями, петля в петле и с многовитковым датчиком. Моделями служили квадратные контуры из провода ГПМП или ГПСМП, расположенные соосно с генераторной и приемной петлями. Величина

Контролируемые параметры модели в виде нагруженной на резистор незаземленной петли

Параметр модели	На что влияет
Размер	L, M_{12}, M_{23}, R_n
Положение относительно генераторной и приемной петель	M_{12}, M_{23}
Марка провода	R_n, τ
Резистор R	τ



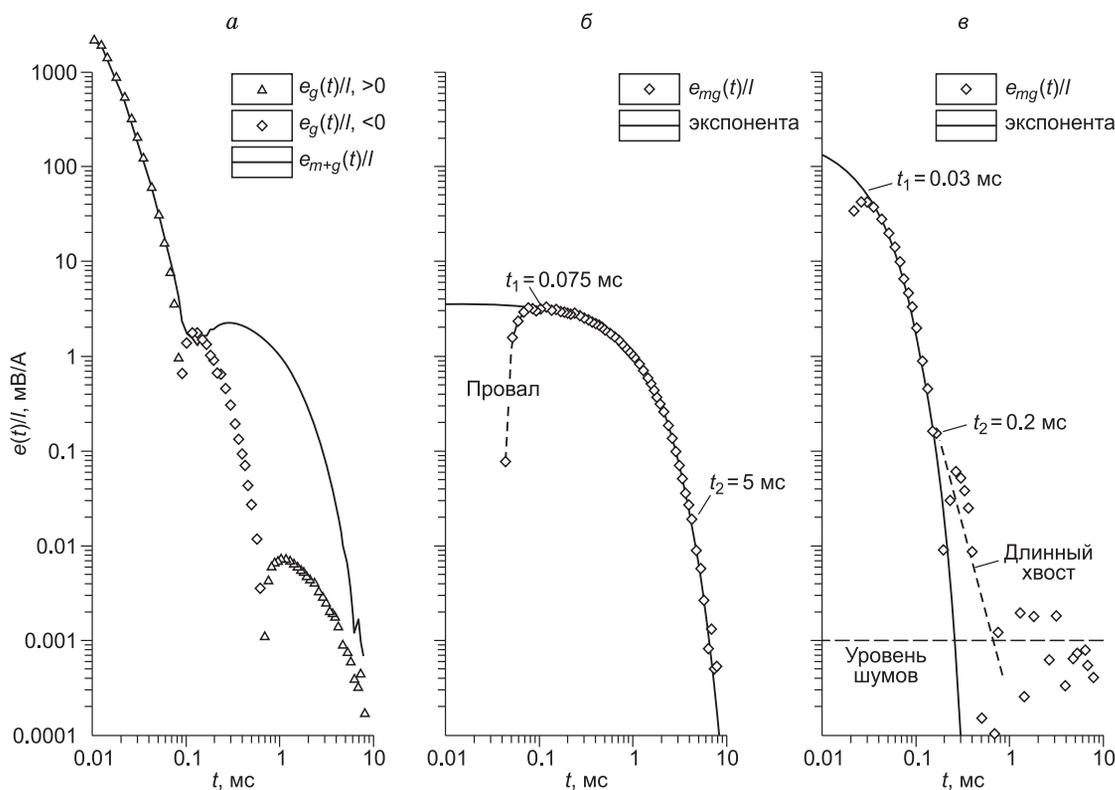


Рис. 5. Результаты полевого эксперимента в окрестностях кимберлитовой трубки им. XXIII съезда КПСС.

a — переходные характеристики, измеренные при разомкнутой ($R = \infty$) и закороченной ($R = 0$) петле-модели; *б, в* — графики $e_{mg}(t)/I$ и аппроксимирующие их экспоненты в случае, когда $R = 0$ (*б*) и $R = 20$ Ом (*в*). Совмещенная установка 100×100 м; модель-петля размером 50×50 м из провода ГПМП, расположенная в центре генераторно-приемной установки. Для подбора экспоненты использовались значения $e_{mg}(t)/I$ на интервале временных задержек от t_1 до t_2 .

подключаемого к контуру-модели резистора задавалась с помощью моста сопротивлений. Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась аппаратура Цикл-5. На каждой точке проводилась серия измерений с различными значениями добавочного резистора R в диапазоне от ∞ (петля-модель разомкнута) до 0 (модель закорочена). При $R = \infty$ осуществлялось измерение переходной характеристики $e_g(t)/I$ геологической среды. Когда модель замыкалась с помощью резистора, измерялась переходная характеристика $e_{g+m}(t)/I$ системы земля + модель. Затем по формуле (9) вычислялся разностный сигнал.

Рис. 5 иллюстрирует типичные результаты. Измерения выполнены вблизи кимберлитовой трубки им. XXIII съезда КПСС. Геологический разрез представлен здесь тонким слоем рыхлых четвертичных отложений, перекрывающих юрские песчано-глинистые осадочные породы, подстилаемые терригенно-карбонатными породами нижнепалеозойского возраста. Согласно результатам интерпретации зондирований методом переходных процессов с симметричной установкой (генераторная петля 100×100 м, приемная — 50×50 м) до глубин порядка 200 м, геоэлектрический разрез на участке работ соответствует однородному поляризуемому полупространству с удельным сопротивлением 100—200 Ом·м [Kozhevnikov, Antonov, 2008].

Графики измеренной ЭДС показаны на рис. 5, *a*. Один из них, $e_g(t)/I$, представляет переходную характеристику земли (контур-модель разомкнут, $R = \infty$). В мерзлых породах верхней части разреза в районе исследований наблюдаются эффекты быстро устанавливающейся поляризации, при измерении индукционных переходных характеристик проявляющиеся в нарушении монотонности сигнала и/или изменении его полярности [Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Поэтому на графике $e_g(t)/I$ отмечается интервал с отрицательной полярностью ЭДС. Второй график (см. рис. 6, *a*) показывает ЭДС $e_{g+m}(t)/I$, индуцируемую в приемной петле при закороченной модели ($R = 0$).

На рис. 5, *б* показан график $e_{mg}(t)/I$ разности приведенных слева переходных характеристик (см. рис. 5, *a*) и аппроксимирующая его экспонента. На рис. 5, *в* приведены графики $e_{mg}(t)/I$ и экспоненты для

случая, когда к контуру-модели был подключен резистор с сопротивлением 20 Ом. При подборе экспоненты учитывались не все данные, а только из временного интервала от t_1 до t_2 , в пределах которого экспонента хорошо вписывается в экспериментальный график. Логично предположить, что на данном интервале $e_{mg}(t)/I \approx e_m(t)/I$ и в этом диапазоне можно реализовать упоминавшуюся выше простую методику проверки измерительной системы.

На ранних ($t < t_1$) и поздних ($t > t_2$) временах графики $e_{mg}(t)/I$ отклоняются от экспоненты. В области ранних времен наблюдается провал — резкое понижение ЭДС $e_{mg}(t)/I$ по отношению к аппроксимирующей ее экспоненте. На самых ранних временах значения $e_{mg}(t)/I$ становятся отрицательными, однако, поскольку переходные характеристики построены в логарифмическом масштабе, отрицательные значения на графиках не отображаются. Анализ всех экспериментальных данных, измеренных на разных участках с разными установками и моделями, показал, что провал проявляется тем раньше, чем меньше постоянная времени модели.

На поздних временах на графиках $e_{mg}(t)/I$ появляется длинный хвост, выражающийся в замедлении спада ЭДС по отношению к аппроксимирующей ее экспоненте (см. рис. 5, в). Этот феномен также проявляется тем раньше и тем отчетливее, чем меньше постоянная времени модели. Анализ результатов измерений с разными моделями и установками показал, что при $t > t_2$ ЭДС $e_{mg}(t)/I$ убывает пропорционально t^{-x} , где $x \approx 3-4$.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛИ

На начальном этапе исследований было высказано предположение, что появление провалов и длинных хвостов связано с несовершенством аппаратуры. Однако, как выяснилось, причина отклонения графиков $e_{mg}(t)/I$ от экспоненты заключается в воздействии, которое вихревые токи в земле оказывают на переходный процесс в замкнутой петле.

Напомним, что когда удельное сопротивление земли велико, она не оказывает влияния на переходный процесс тока в модели. В этом случае ЭДС, воздействующая на модель, существует только во время выключения тока в генераторной петле (см. выражения (1а), (1б), рис. 3, б). Под действием этой ЭДС в модели возникает ток, описываемый формулами (2а), (2б). В свою очередь, ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет затухания тока в модели, описывается выражениями (7а), (7б).

Этот случай показан на рис. 6, где приведены графики воздействующей на модель ЭДС и переходного процесса тока, рассчитанного по формулам (2а), (2б). Расчеты выполнены для соосной установки с генераторной петлей радиусом 50 м, приемной петлей радиусом 10 м; радиус модели, совмещенной с приемной петлей, также равен 10 м. Такие размеры установки выбраны исходя из их соответствия обычно используемым при съемках методом переходных процессов в Якутии. При расчетах было принято, что установившееся значение тока в генераторной петле равно 1 А, а время его выключения — 10 мкс (примерно за это время выключается ток в генераторной петле указанного размера с помощью современных устройств, в том числе с использованием коммутатора тока станции Цикл-5). Постоянная времени модели τ составляла 100 мкс.

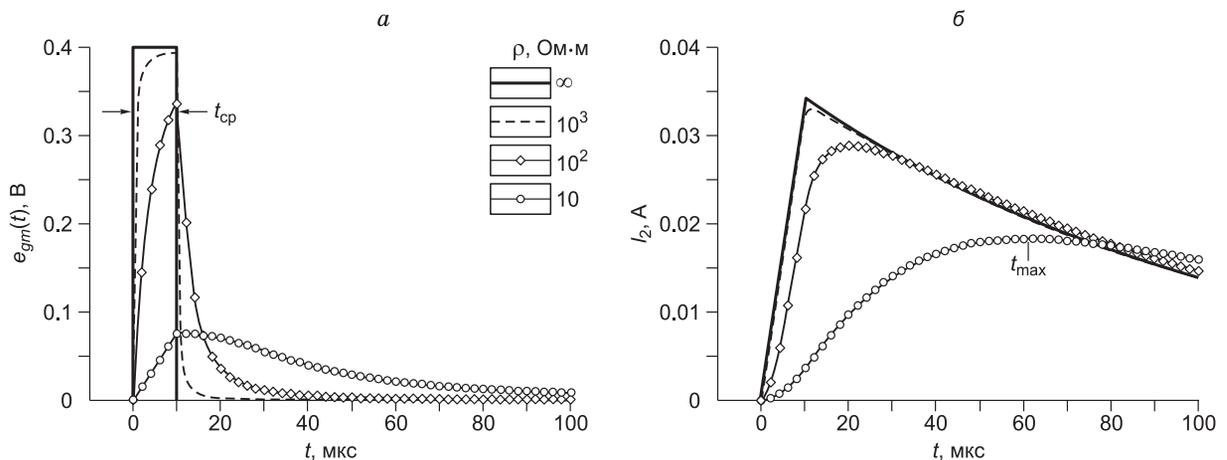


Рис. 6. Графики ЭДС, воздействующей на петлю-модель (а), и переходного процесса тока (б) в модели.

Здесь и на рис. 7 расчеты выполнены для установки с соосными круглыми петлями: радиус генераторной петли — 50 м, приемной — 10 м. Петля-модель радиусом 10 м совмещена с измерительной. Постоянная времени модели $\tau = 100$ мкс. Ток в генераторной петле 1 А, $t_{cp} = 10$ мкс.

В рассматриваемом идеальном случае (непроводящая земля) воздействие на модель представлено прямоугольным импульсом ЭДС длительностью t_{cp} . Для выбранного соотношения t_{cp}/τ ток в модели в интервале от 0 до t_{cp} нарастает практически линейно, после чего убывает по экспоненте с постоянной времени τ .

Как правило, установка и петля-модель располагаются на поверхности проводящего полупространства. Логично предположить, что воздействующая на контур-модель ЭДС создается не только вследствие изменения тока в генераторной петле, но и за счет устанавливающихся в земле вихревых токов. Поэтому для расчета тока $I_2(t)$ в модели необходимо сначала рассчитать ЭДС $e_{gm}(t)$, воздействующую на модель с учетом влияния земли, а затем осуществить свертку $e_{gm}(t)$ с токовой импульсной переходной характеристикой $i_2(t)$ модели:

$$I_2(t) = e_{gm}(t) \cdot i_2(t) . \quad (13)$$

Импульсная характеристика $i_2(t)$ описывает ток, возникающий в модели под воздействием очень короткого импульса ЭДС с площадью 1В·с. Для петли, к зажимам которой подключен резистор $R_m = R_n + R$,

$$i_2(t) = \frac{1B \cdot c}{L} e^{-t/\tau} ,$$

где $\tau = L/R_m$.

Графики $e_{gm}(t)$, рассчитанные для трех значений удельного электрического сопротивления ρ полупространства: 10 , 10^2 и 10^3 Ом·м, приведены на рис. 6, а. Поскольку радиус петли-модели в пять раз меньше, чем у генераторной петли, расчет $e_{gm}(t)$ выполнен с помощью аналитического выражения для азимутальной компоненты электрического поля вертикального магнитного диполя, расположенного на поверхности однородного проводящего полупространства [Spies, Frischknecht, 1991]. Как нетрудно видеть, при расположении установки и модели на поверхности слабопроводящей земли воздействующий на модель импульс ЭДС характеризуется малой (около 20 мкс) длительностью и по форме близок к прямоугольному, наблюдаемому в идеальном случае, когда установка и модель находятся на поверхности непроводящего полупространства. При понижении ρ до 100 Ом·м нарастание ЭДС в интервале от 0 до 10 мкс замедляется, и к моменту окончания процесса выключения тока в генераторном контуре она не успевает достичь значения, определяемого формулами (2а), (2б) при $t = t_{cp}$. После того, как ток в генераторной петле выключен, воздействие на контур-модель не прекращается, а убывает в течение первых десятков микросекунд. При дальнейшем понижении удельного сопротивления (10 Ом·м) амплитуда импульса ЭДС не достигает 0.1 В, а его длительность возрастает до сотен микросекунд.

Графики тока $I_2(t)$, рассчитанные путем свертки токовой импульсной характеристики модели с воздействующей на нее ЭДС (см. рис. 6, а), показаны на рис. 6, б. При расчетах было принято, что постоянная времени модели равна 100 мкс. Для слабопроводящей земли ($\rho = 10^3$ Ом·м) ток в модели начинает убывать практически сразу же после того, как выключен ток в генераторной петле. На временах, превышающих t_{cp} , вихревые токи в земле также убывают во времени. Приемная петля реагирует на скорость изменения магнитного поля, которое, в свою очередь, определяется скоростью изменения магнитного поля, создаваемого вихревыми токами в земле и током $I_2(t)$ в петле-модели. Поскольку как вихревые токи в земле, так и ток в модели убывают, их вклады в измеряемый сигнал имеют один знак, поэтому уже на самых ранних временах ЭДС, индуцируемая в приемной петле токами в системе земля + модель, представляет собой сумму ЭДС, создаваемых каждым из компонентов этой системы.

При понижении удельного сопротивления земли нарастание тока в модели затягивается. Так, если $\rho = 10^2$ Ом·м, ток достигает максимального значения при $t = 20$ мкс; если же $\rho = 10$ Ом·м, максимум тока отмечается на времени $t = 60$ мкс. Скорость спада тока в модели также уменьшается по мере того, как подстилающие ее породы делаются все более проводящими. Теперь до момента t_{max} , когда ток в модели достигает наибольшей величины, скорость его изменения противоположна скорости изменения вихревых токов в земле. Таким образом, на временах $t < t_{max}$ ЭДС, создаваемая в приемной петле за счет переходного процесса тока в модели, вычитается из ЭДС, индуцируемой затухающими в земле вихревыми токами. Поэтому в области ранних времен на экспериментальных переходных характеристиках модели $e_{mg}(t)/I$ наблюдаются провалы.

Представленные на рис. 6, б результаты говорят о возможности изучения сопротивления земли путем измерения переходного процесса тока в модели. В контексте данной статьи нецелесообразно обсуждать достоинства и недостатки такого способа измерений (например, шумы измерительной системы, ее быстроедействие и т.п.). Заметим только, что хотя индукционные датчики в виде короткозамкнутой петли давно используются при измерении переменных магнитных полей в проводящих средах [Зимин, Кочанов, 1985], они пока не нашли применения в электроразведке.

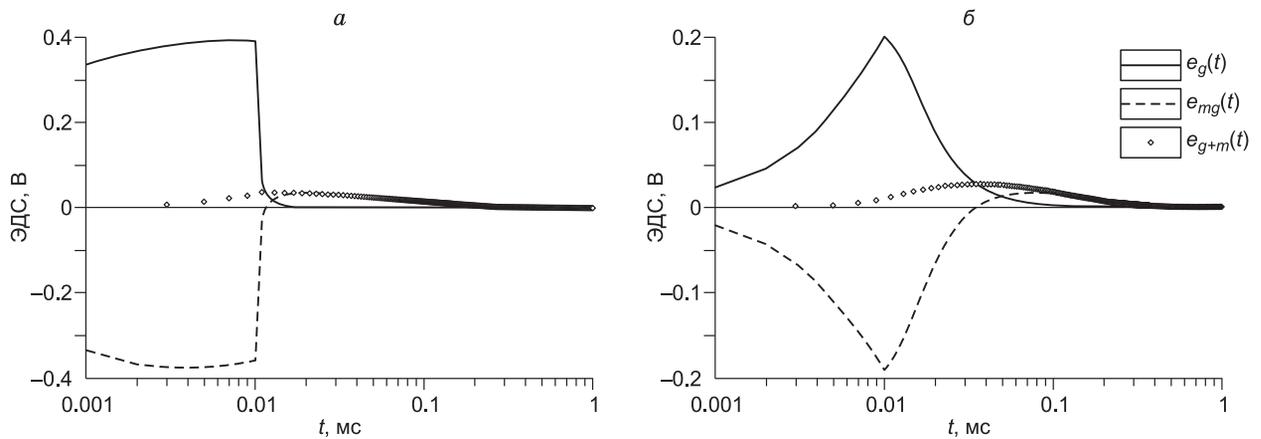


Рис. 7. Переходные характеристики, рассчитанные для $\rho = 10^3$ Ом·м (а) и 30 Ом·м (б).

Обычно в методе переходных процессов измеряют не ток в замкнутой петле, а индуцируемую в приемной петле ЭДС. Поэтому имеет смысл рассмотреть результаты моделирования, представленные в виде графиков ЭДС, наводимой в приемной петле, в зависимости от времени. Эти результаты (для упомянутых выше размеров установки, длительности среза тока в генераторной петле и постоянной времени модели) приведены на рис. 7, а, б, на каждом из которых показаны три переходные характеристики.

1. ЭДС $e_g(t)$, наводимая в приемной петле вихревыми токами в земле.
2. ЭДС $e_{mg}(t)$, индуцируемая в приемной петле за счет изменения тока в контуре-модели. Расчет проводился по формуле

$$e_{mg}(t) = -M_{23} \frac{dI_2}{dt}. \quad (14)$$

В рассматриваемом случае приемная петля совмещена с моделью, поэтому $M_{23} = L$.

3. Суммарный сигнал $e_{g+m}(t) = e_g(t) + e_{mg}(t)$.

Напомним, что $e_g(t)$ и $e_{mg}(t)$ — величины, измеряемые в поле.

Переходные характеристики (см. рис. 7, а, б) рассчитаны для полупространства с удельным сопротивлением $\rho = 10^3$ Ом·м и 30 Ом·м соответственно. В обоих случаях во время выключения тока в генераторном контуре сигналы от проводящей земли и от модели близки по амплитуде (особенно на самых ранних временах), но имеют противоположную полярность. Поэтому ЭДС суммарного сигнала $e_{g+m}(t)$ сначала близка к нулю, а затем плавно нарастает до значений намного меньших тех, которые наблюдались бы в отсутствие модели. Максимум $e_{g+m}(t)$ появляется уже после того, как ток в генераторном контуре выключен, причем тем позже, чем ниже сопротивление земли. При дальнейшем возрастании t ЭДС, наводимая токами в земле, становится все меньше по сравнению с индуцируемой токами в модели, и вклад сигнала от модели в суммарную переходную характеристику становится преобладающим. Суммарный сигнал достигает максимума тем раньше, чем выше удельное сопротивление подстилающей среды: при $t = 20$ мкс для $\rho = 10^3$ Ом·м и при $t = 100$ мкс, когда $\rho = 30$ Ом·м.

Еще раз отметим, что на интервале от $t = 0$ до $t = t_{cp}$, т. е. во время выключения тока в генераторной петле, амплитуда суммарной ЭДС намного меньше по сравнению с той, которая наблюдается при разомкнутой модели. Кроме этого, когда модель замкнута, приемная петля и регистрирующая аппаратура подвергаются более плавному начальному воздействию. Поэтому контур-модель представляет собой своеобразный «демпфер», который может оказаться полезным в тех случаях, когда из-за высокого сопротивления зондируемой среды и/или слишком сильной индуктивной связи между генераторной и приемной петлями измерительная система надолго выходит из рабочего режима вследствие перегрузки.

Влияние постоянной времени τ модели на графики $e_m(t)/I$ и $e_{mg}(t)/I$ иллюстрирует рис. 8. При расчете $e_m(t)/I$ было принято, что влияние земли отсутствует ($\rho = \infty$). Расчет $e_{mg}(t)/I$ выполнен для $\rho = 10^2$ Ом·м. Графики переходных характеристик приведены для $\tau = 0.5, 0.05$ и 0.005 мс. Обращает на себя внимание сходство модельных графиков $e_{mg}(t)/I$ с полученными в результате полевых экспериментов (см. рис. 5, б, в). При уменьшении постоянной времени расхождения между идеальной ($\rho = \infty$) и реальной ($\rho = 10^2$ Ом·м) переходными характеристиками модели, проявляющиеся как провал и длинный хвост, наблюдаются на все более ранних временах.

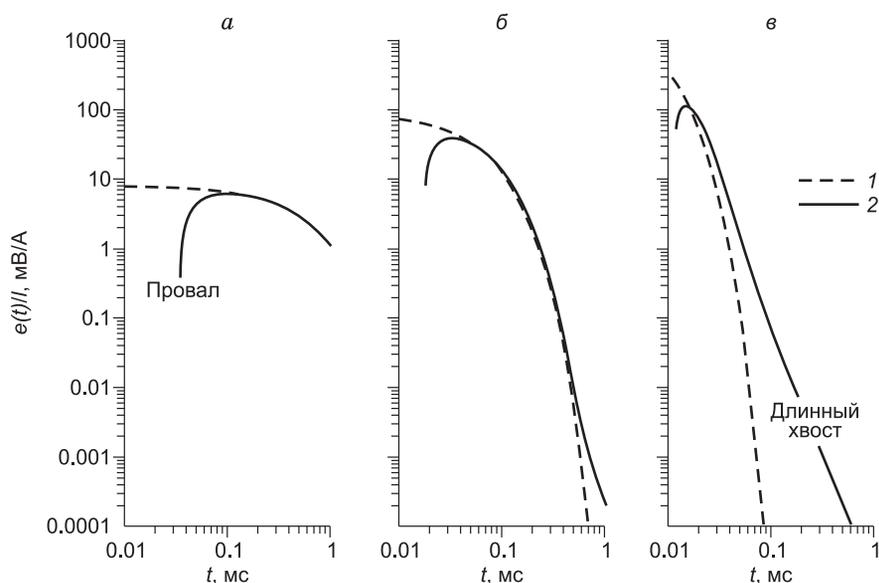


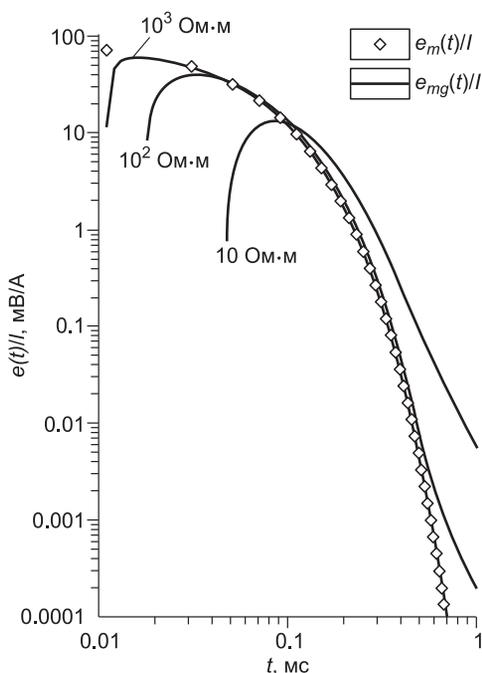
Рис. 8. Результаты компьютерного эксперимента, имитирующего полевые измерения.

1 — $e_m(t)/I$ — переходная характеристики модели в присутствии непроводящей земли, 2 — $e_{mg}(t)/I$ — с учетом влияния вихревых токов в полупространстве с $\rho = 100$ Ом·м. Постоянная времени модели: 0.5 мс (а), 0.05 мс (б), 0.005 мс (в).

Длинный хвост в двойном логарифмическом масштабе выглядит как прямая линия. Это означает, что на поздних временах переходная характеристика модели описывается степенной зависимостью

$$\frac{e_{mg}(t)}{I} \propto t^{-x}. \quad (15)$$

Наилучшая аппроксимация длинных хвостов наблюдается при $x = 3.5$. ЭДС, наводимая в приемной петле, пропорциональна скорости изменения тока I_2 в модели, т. е. его производной. Поэтому на поздних временах ток убывает по степенному закону с показателем $x = 2.5$, т. е. так же, как и ЭДС, воздействующая на модель и любой другой контур (включая приемную петлю) в присутствии однородного проводящего полупространства. Объясняется это просто: на поздних временах индуктивное сопротивление модели мало по сравнению с активным, вследствие чего воздействующая на модель ЭДС и создаваемый ею ток изменяются синфазно.



При $\tau = 0.5$ мс и 0.05 мс существует временной диапазон, в котором идеальная и реальная переходные характеристики совпадают. В этом диапазоне может быть проведена описанная выше простая проверка качества системы. При малых τ идеальная ($e_m(t)/I$) и реальная ($e_{mg}(t)/I$) переходные характеристики модели отличаются во всем временном диапазоне (см. рис. 8, в).

При $\tau = 0.5$ мс и 0.05 мс существует временной диапазон, в котором идеальная и реальная переходные характеристики совпадают. В этом диапазоне может быть проведена описанная выше простая проверка качества системы. При малых τ идеальная ($e_m(t)/I$) и реальная ($e_{mg}(t)/I$) переходные характеристики модели отличаются во всем временном диапазоне (см. рис. 8, в).

Рис. 8 иллюстрирует зависимость переходной характеристики модели от τ при фиксированном ($\rho = 10^2$ Ом·м) сопротивлении земли. Не менее важно представлять, каким образом на переходную характеристику модели влияет удельное сопро-

Рис. 9. Переходные характеристики модели, расположенной на поверхности непроводящего (ромбы) и проводящего (сплошные линии) полупространства.

Соосная установка — радиус генераторной петли 50 м, измерительной — 10 м, $t_{cp} = 0.01$ мс. Петля-модель имеет радиус 10 м и пространственно совмещена с приемной петлей. Постоянная времени модели $\tau = 0.05$ мс.

тивление подстилающего установку полупространства. Это влияние показано на рис. 9, где приведены переходные характеристики модели с постоянной времени $\tau = 0.05$ мс для непроводящей ($\rho = \infty$) и проводящей ($\rho = 10, 10^2$ и 10^3 Ом·м) земли. Как и следовало ожидать, слабопроводящее ($\rho = 10^3$ Ом·м) полупространство оказывает незначительное влияние на процесс становления тока в замкнутом проводочном контуре. В этом случае переходная характеристика модели с учетом влияния земли во всем диапазоне временных задержек, реализуемых при использовании серийной аппаратуры, не отличается от наблюдаемой в присутствии непроводящего полупространства. Понижение сопротивления до 10^2 Ом·м приводит к появлению провала и длинного хвоста. Это сужает диапазон времен, в котором графики $e_m(t)/I$ и $e_{mg}(t)/I$ совпадают. При дальнейшем понижении ρ переходная характеристика модели, рассчитанная с учетом влияния земли, все меньше напоминает экспоненту и расходится с идеальной во всем временном диапазоне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показывают результаты, изложенные в предыдущих разделах, предлагаемая методика может быть реализована в той мере, в какой переходный процесс тока в контуре-модели не зависит от подстилающей среды.

Если принять, что собственная переходная характеристика модели представляет собой полезный сигнал, а та добавка, которая вносится за счет влияния земли, — помеху, то необходимо стремиться организовать измерения таким образом, чтобы отношение сигнал/помеха оказалось не ниже некоторого допустимого значения (например, 10, 10^2 и т.п.).

Как показано выше (см. рис. 9), при прочих равных условиях влияние земли быстро уменьшается при возрастании ее удельного сопротивления. Очевидно, чем шире временной диапазон, в котором необходимо оценить качество измерительной системы, тем выше должно быть сопротивление подстилающего полупространства.

Для расширения временного диапазона можно рекомендовать измерения с набором моделей с разными τ . Когда к модели подключен резистор большого номинала, ее постоянная времени мала, и это позволяет оценить параметры измерительной системы на ранних временах. Если сопротивление резистора мало, постоянная времени велика, тогда можно дать оценку системы на поздних временах. При этом необходимо следить за тем, чтобы при уменьшении τ не выйти за пределы временного диапазона, где $e_{mg}(t)/I = e_m(t)/I$ (см. рис. 8).

Когда геоэлектрический разрез на участке, где проводятся измерения, изучен с достаточной степенью детальности, ограничения, связанные с влиянием проводящей земли на переходный процесс тока в модели, снимаются (во всяком случае, в принципе). Если геоэлектрическое строение участка известно, можно с помощью той или иной программы (например, для горизонтально-слоистой среды ПОДБОР [Могилатов и др., 2007], ТЕМ-IP [Антонов и др., 2010] и др.) рассчитать ЭДС $e_{gm}(t)$, воздействующую на петлю-модель, после чего, свернув ее с токовой импульсной характеристикой модели $i_2(t)$, найти ЭДС $e_{mg}(t)$, индуцируемую в приемной петле током в модели. Затем рассчитанная таким образом и приведенная к току ЭДС ($e_{mg}(t)/I$) сравнивается с найденной экспериментально.

На первый взгляд такая методика может показаться слишком сложной или даже надуманной. В частности, возникает вопрос: для чего нужен контур-модель: ведь если известны параметры геоэлектрической среды, можно просто сравнить измеренные и рассчитанные для известной геоэлектрической модели переходные характеристики. Подобный подход применим, но лишь в относительно простых геоэлектрических условиях и/или при использовании установок большого размера, когда интерес представляют умеренные и большие глубины. Многолетний опыт съемок методом переходных процессов показывает, что при проведении работ в районах со сложными геоэлектрическими условиями (высокие сопротивления, поляризуемость, магнитная вязкость, неоднородности или сочетание указанных факторов) нередко возникают сомнения по поводу того, чем вызваны необычные переходные характеристики: геологическими причинами или ограниченными возможностями измерительной системы [Вахромеев, Кожевников, 1988; Kozhevnikov, Antonov, 2008; Стогний и др., 2010]. Проблема усугубляется при попытках уменьшить начальную глубину исследований путем регистрации переходных процессов в микросекундном диапазоне, что влечет за собой необходимость использовать петли небольшого размера [Кожевников, Плотников, 2004].

Именно в таких ситуациях необходима модель с контролируемыми параметрами, по размерам сопоставимая с геологическими объектами. С такой моделью можно даже в сложных условиях спланировать и осуществить контролируемый эксперимент, который позволит разобраться, в каком временном диапазоне, при какой геометрии (размерах) установки, параметрах аппаратуры и с какой погрешностью полученные данные отражают геологию, и где начинает преобладать влияние собственного отклика измерительной системы. Эффективность такого подхода применительно к аэроэлектроразведке методом переходных процессов проиллюстрирована в упомянутых выше работах [Davis, Macnae, 2008a,b].

Исследования, результаты которых изложены в статье, были мотивированы необходимостью предложить методику оценки качества реальной, развернутой на местности наземной измерительной системы для зондирований методом переходных процессов. Наряду с обоснованием методики были получены новые данные, позволяющие лучше понять, какое влияние на переходную характеристику проводника ограниченных размеров оказывает проводящее полупространство. В разряд дополнительных бонусов следует отнести тот факт, что, поместив приемную петлю или индукционный датчик в центр замкнутого проволочного контура, можно снизить амплитуду и скорость нарастания начального воздействия на измерительный тракт. Кроме этого, показано, что переходный процесс тока в замкнутой петле содержит информацию об удельном сопротивлении подстилающего полупространства.

Наконец, следует отметить, что при расчете переходного процесса тока в петле-модели учитывалась добавка к воздействующей на модель ЭДС, создаваемая вихревыми токами в земле. Хотя учет обратного влияния тока в модели на вихревые токи в земле не представляет принципиальных трудностей, подобные расчеты не проводились. Поскольку при амплитуде тока в генераторной петле 1 А ток в петле-модели по порядку величины не превосходит первых десятков миллиампер (см. рис. 6, б), логично предположить, что влияние модели на переходный процесс в земле незначительно.

ВЫВОДЫ

Методика оценки возможностей системы для зондирований методом переходных процессов должна включать измерения в поле с использованием моделей, по размерам сопоставимым с генераторно-приемной установкой и изучаемыми геологическими объектами.

В качестве такой модели удобно использовать горизонтальную петлю, нагруженную на известное сопротивление. Ее достоинствами являются простота раскладки на местности, возможность контролировать параметры и рассчитать собственную переходную характеристику.

Если существует уверенность в том, что подстилающая среда не оказывает заметного влияния на переходный процесс тока в модели, оценка качества измерительной системы особенно проста и включает следующие операции: расчет переходной характеристики модели $e_m(t)/I$ по формуле (2б); измерение $e_g(t)/I$ (модель разомкнута) и $e_{m+g}(t)/I$ (модель нагружена на резистор); расчет $e_{mg}(t)/I = e_{m+g}(t)/I - e_g(t)/I$; сравнение $e_{mg}(t)/I$ и $e_m(t)/I$.

В тех случаях, когда влияние подстилающего полупространства на переходный процесс тока в нагруженной на резистор петле значительно, измерение тока можно использовать для оценки удельного сопротивления земли.

Замкнутая петля-модель снижает скорость нарастания и амплитуду начального воздействия на измерительную петлю или индукционный датчик.

Автор выражает благодарность В.А. Ванчугову и В.Н. Новопащину за помощь в организации и проведении полевых измерений, а также А.К. Захаркину и анонимному рецензенту за замечания и предложения по улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» — Система для интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред // Первая международная научно-практическая конференция по электромагнитным методам исследования «ГЕОБАЙКАЛ-2010», Иркутск, 2010.

Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. Иркутск, Изд-во Иркут. ун-та, 1988, 224 с.

Вишняков А.Э., Вишнякова К.А. Возбуждение и измерение полей в электроразведке. Л., Недра, 1974, 129 с.

Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «ЦИКЛ». Новосибирск, СНИИГГиМС, 1981, 99 с.

Захаркин А.К., Тарло Н.Н. Проблемы метрологического обеспечения структурной импульсной электроразведки // Геофизика, 1999, № 6, с. 34—39.

Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М., Энергоатомиздат, 1985, 256 с.

Кожевников Н.О. Незаземленная горизонтальная петля как система с незаземленными параметрами // Геофизика, 2006, № 1, с. 29—39.

Кожевников Н.О. Применение теории длинных линий для исследования собственной переходной характеристики незаземленной горизонтальной петли // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 300—316.

Кожевников Н.О., Плотников А.Е. Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика, 2004, № 6, с. 33—38.

Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2007, 157 с.

Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.

Стогний Вас.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Исследование магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания с помощью импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (11), с. 1565—1575.

Davis A.C., Macnae J. Quantifying AEM system characteristics using a ground loop // Geophysics, 2008a, v. 73, № 4, p. F179—F188.

Davis A.C., Macnae J. Measuring AEM waveform with a ground loop // Geophysics, 2008b, v. 73, № 6, p. F213—F222.

Grant F.S., West G.F. Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill, 1965, 583 p.

Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Early time TEM response of an ungrounded horizontal loop — a new look: 62nd EAGE Conference, Expanded Abstracts, 2000, Glasgow, D-11, 2000.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // J. App. Geophys., 2008, v. 66, p. 31—43.

Spies B.R., Frischknecht F.C. Electromagnetic sounding // Electromagnetic methods in applied geophysics / Ed. M.N. Nabighian. SEG, 1991, v. 2, p. 285—425.

*Рекомендована к печати 16 февраля 2012 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
28 августа 2011 г.*