

ПРОЦЕСС ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛЕ И ЕГО СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Кожевников Н.О.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск,

Результаты полевых экспериментов свидетельствуют о том, что на ранних временах и/или высоких частотах горизонтальная незаземленная петля проявляет себя как система с распределенными параметрами. При моделировании процесса выключения тока в петле использован прием, основанный на представлении петли в виде комбинации двух идентичных длинных линий с закороченными выходами. Моделирование осуществлялось в частотной области, после чего выполнялась трансформация во временную область. На основе сопоставления измеренных и модельных графиков затухания амплитуды стоячих волн тока в петле показано, что при расчете первичных параметров системы «провод петли – земля» необходимо учитывать взаимное влияние линий, которое приводит к зависимости их первичных параметров, и, соответственно, параметров петли в целом, от удельного электрического сопротивления земли. Это дает основание рассматривать высокочастотные колебания тока в петле в качестве источника информации об электрических свойствах ВЧР. На ранних временах незаземленная горизонтальная петля не является симметричной, и ее первичное магнитное поле отличается от постулируемого в теории импульсной индуктивной электроразведки.

Ключевые слова: индуктивная электроразведка, незаземленная петля, выключение тока, длинная линия

На низких частотах и/или поздних временах для моделирования собственного отклика незаземленной горизонтальной петли допустимо использовать эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами. Однако в общем случае петля является системой с распределенными параметрами. На высоких частотах и/или ранних временах провод петли в совокупности с подстилающей его землей образуют длинную линию, поведение тока в которой описывается волновым уравнением. Первичные параметры линии «провод – земля» сложным образом зависят от удельной электропроводности земли и частоты или времени, вследствие чего решение волнового уравнения, описывающего процесс выключения тока в петле, представляет значительные трудности.

На первый взгляд, длинная линия, образованная землей и расположенным на ней проводом, имеет мало общего с незаземленной горизонтальной петлей. Однако благодаря симметрии петля может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, которые включены последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена. Источник тока/напряжения также можно представить в виде комбинации двух идентичных последовательно соединенных источников, общая точка которых заземлена.

На рис. 1а изображена расположенная на поверхности земли квадратная петля с подключенным к ней источником тока либо напряжения. Длина провода, образующего петлю, равна P . На рис. 1б показано, каким образом петля и генератор могут быть представлены в виде двух идентичных линий, длиной $P/2$ каждая, включенных последовательно. В то время как на рис. 1а цифра 2 символизирует источник с выходным напряжением U и внутренним сопротивлением R_i , на рис. 1б, цифрой 3 отмечены источники с выходным напряжением $U/2$ и внутренним сопротивлением $R_i/2$ каждый.

Поскольку представленная на рис. 1б система симметрична, точки O и удаленная от нее на расстояние $P/2$ имеют одинаковый потенциал. Если соединить их с землей, это не повлияет на распределение напряжения и тока в петле. Поэтому параметры незаземленной петли с периметром P могут быть получены на основе анализа закороченной на выходе однопроводной линии длиной $l = P/2$ (рис. 1в). Методы расчета таких линий в частотной области подробно описаны в литературе. Поэтому при расчете процесса выключения тока в петле сначала отыскивалось решение в частотной области, которое затем преобразовывалось во временную область.

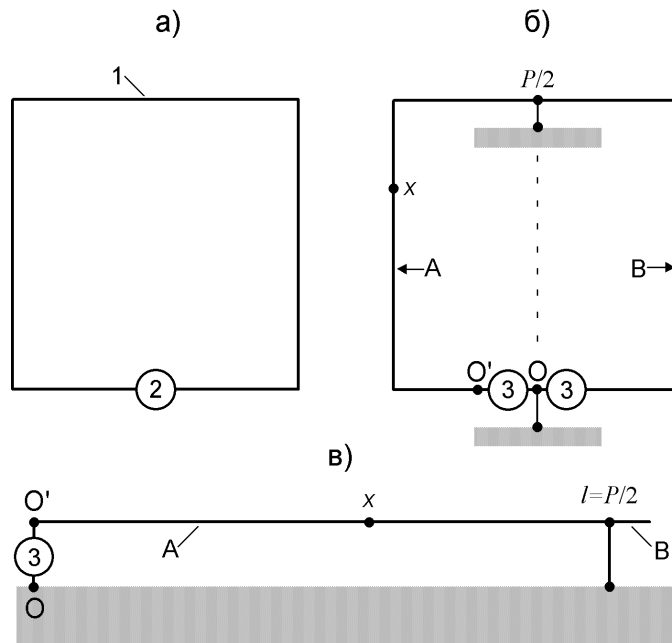


Рис. 1. Горизонтальная незаземленная петля 1 с источником 2 (а); те же петля и источник, представленные в виде двух идентичных линий А, В и источников 3 (б); закороченная на входе линия длиной $l=P/2$ (в).

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 ($x=P/2$). Когда волна достигает средней точки петли, 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. В работах [1, 2] показано, что во время выключения тока незаземленная горизонтальная петля не является симметричной, и ее первичное магнитное поле отличается от постулируемого в теории импульсной индуктивной электроразведки.

Для того, чтобы выяснить, в какой мере описанная выше модель петли согласуется с экспериментальными данными, сравним колебания тока, измеренные в средней части петли размером 200м x 200м из провода ГПМП, с теми, которые предсказывает модель (рис. 2а). Точка с координатой $x=P/2$ выбрана из тех соображений, что здесь наблюдается максимальная амплитуда стоячей волны тока [1, 2].

Расчет индуктивности и погонного сопротивления осуществлялся с учетом скин-эффекта в проводе и земле. До глубины 200-250 м геоэлектрический разрез на участке, где располагалась петля, представлен однородным полупространством с удельным электрическим сопротивлением ρ порядка нескольких сотен Ом·м. Приведенный на рис. 2а модельный график рассчитан для $\rho=500$ Ом·м.

Погонная емкость C провода зависит от многих факторов, которые а priori не известны и не поддаются точному учету. В подобной ситуации единственное возможное решение заключается в том, чтобы задаться некоторой разумной оценкой емкости, а потом, если возникнет необходимость,

«подправить» C . Иными словами, емкость представляет собой подгоночный параметр. При расчете колебаний тока, показанных на рис. 2, было принято, что $C=4.7 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

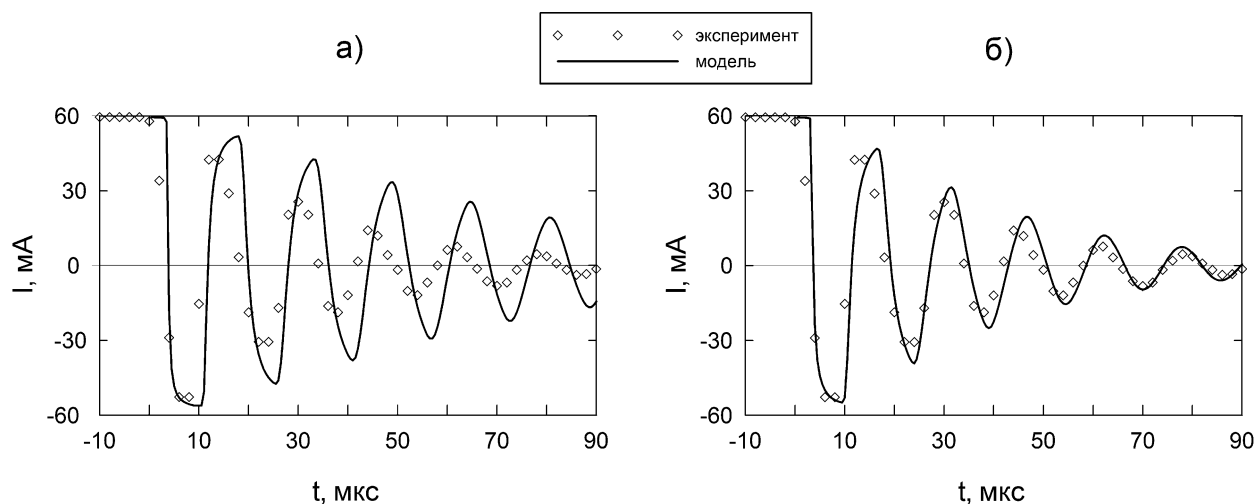


Рис. 2. Измеренный и модельный графики колебаний тока в средней точке ($x=P/2$) провода петли размером 200м x 200м. Расчеты выполнены: а – с учетом скин-эффекта в земле и проводе; б – дополнительно учтено влияние индуктивной связи между линиями, образующими петлю.

Хотя в целом между экспериментальными и модельными данными наблюдается соответствие, имеются отличия в периоде и, особенно, скорости затухания колебаний. Комментируя этот результат, необходимо отметить, что путем «подгонки» погонной емкости можно уменьшить расхождение в периоде, которое и так незначительно. Амплитуда как экспериментальных, так и модельных колебаний тока убывает по экспоненциальному закону, однако в реальной петле колебания затухают намного быстрее, чем предсказывает модель. В отличие от периода колебаний, в случае с затуханием ситуация оказывается более сложной: в рамках рассмотренной выше модели нет параметров, подбирая которые можно было бы повлиять на постоянную времени затухания стоячей волны тока. Из теории однопроводных длинных линий известно, что сопротивление, вносимое в расположенный над однородным проводящим полупространством провод за счет скин-эффекта в земле, не зависит от ее удельного электрического сопротивления. При тех значениях высоты расположения провода, которые можно ожидать при его раскладке в условиях реальной местности, высота провода также не оказывает влияния на его сопротивление и индуктивность. Хотя индуктивность провода зависит от удельного сопротивления земли, эта зависимость слишком слабая для того, чтобы сопротивление земли можно было использовать в качестве параметра, подбирая который можно было бы «подогнать» модельные данные под экспериментальные.

Все это приводит к выводу о том, что модель петли в виде симметричной комбинации двух длинных линий, образованных проводом петли и подстилающей его землей, дает разумные предсказания, однако не учитывает какую-то существенную особенность рассматриваемой системы.

Напомним, что рассматривая петлю, мы представили ее в виде симметричной композиции из двух идентичных линий (см. рис. 1б, в). Поскольку точка с координатой $x=P/2$ имеет потенциал «земли», т. е. такой же, как точка с координатой $x=0$, было высказано предположение, что процессы, протекающие в каждой из двух «половинок» петли, не влияют друг на друга и могут рассматриваться независимо. Это предположение действительно выполняется, однако лишь при условии, что петля располагается на поверхности среды с очень низким удельным сопротивлением. В этом случае «возвратные» токи в земле протекают в непосредственной близости от проводов АВ и CD, поэтому токовые контуры Г1 и Г2 (рис. 3) не создают в окружающем их пространстве магнитного поля, и взаимная индуктивность M_{12} между ними равна нулю.

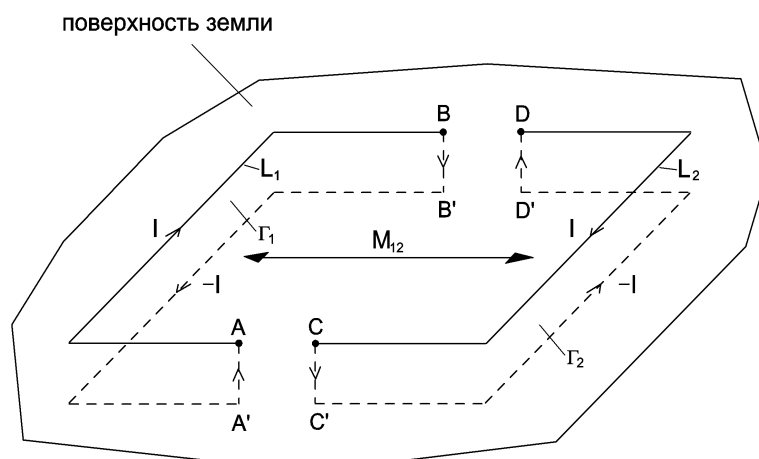


Рис. 3. Две длинные линии. Маленькими черными кружками отмечены места соединения проводов с землей. Чтобы не усложнять рисунок, на нем не показаны источники тока, которые подключены на входе линий (см. рис. 1б). «Прямой» ток (I) в каждой линии протекает по проводу, обратный ток ($-I$) или «ток-изображение» – в земле. При сближении линий увеличивается индуктивная связь между контурами Γ_1 и Γ_2 , которая должна учитываться при анализе петли.

Если сопротивление земли конечно, обратные токи протекают на некотором расстоянии от провода, при этом между контурами Γ_1 и Γ_2 имеет место *индуктивное* взаимодействие. При сближении линий образуется расположенная на поверхности горизонтальная петля с током I , протекающим по часовой стрелке. При этом обратные токи, соединившись в точках A' , C' и B' , D' , образуют «отражение» в виде тока $-I$, протекающего в земле по замкнутому контуру против часовой стрелки. ЭДС, индуцируемая в расположенной на поверхности петле $ABDC$ за счет магнитного поля замкнутого тока-изображения $A' B' D' C'$, дает ту добавку в комплексное сопротивление петли, которая возникает за счет *индуктивного взаимодействия* токов, протекающих по контурам Γ_1 и Γ_2 . Учет добавки приводит к соответствию между модельными и экспериментально наблюдаемыми скоростями затухания колебаний тока в петле (рис. 3б).

Вклад, вносимый в полное сопротивление провода за счет индуктивной связи между двумя линиями, меньше по сравнению с создаваемым скин-эффектом в земле. Однако именно эта составляющая зависит от удельного электрического сопротивления подстилающей среды, что делает возможной оценку удельного сопротивления и, возможно, поляризуемости ВЧР путем инверсии колебаний тока в петле [3]. При измерениях в частотной области зависимость параметров петли от ВЧР ограничивает возможности контролировать ток в источнике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 13-05-00122 а.

Литература

1. Кожевников Н.О. Незаземленная горизонтальная петля как система с распределенными параметрами // Геофизика, 2006, №1, с. 29 – 39.
2. 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.
3. Кожевников Н.О. Затухающие колебания тока в незаземленной горизонтальной петле и их связь с инфильтрацией грунтовых вод // Доклады академии наук, 2011, том 437, №6, с. 820 – 823.