

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 3

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, Новосибирск
И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск
М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов
в 6 т. Т. 3. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 318 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (секция «Гео-
логическое, геофизическое и геохимическое обеспечение поиска и разведки полезных
ископаемых. Геотехнологии. Геоэкология»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРНОЙ ПЕТЛЕ – ИСТОЧНИК СИСТЕМНЫХ ПОМЕХ В ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Средствами эксперимента и теории длинных линий изучены системные помехи, возникающие в измерительной системе для импульсной индуктивной электроразведки при выключении тока в генераторной петле. Показано, что расположение измерительного блока аппаратуры поблизости к середине периметра генераторной петли на 20–40 дБ снижает импульсную помеху, наводимую на входные цепи измерителя и приемный кондуктор.

Ключевые слова: метод переходных процессов, генераторная петля, синфазная помеха.

TRANSMITTER LOOP CURRENT AND VOLTAGE TRANSIENTS AS A SOURCE OF COMMON MODE NOISE IN TEM RESPONSE MEASUREMENTS

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Laboratory for Geoelectrics, phone: (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

By means of experiment and the transmission line theory, I studied the system noise that occurs in a TEM measuring system after terminating the transmitter loop current. The location of the measuring unit near the middle part of the transmitter loop reduces, by 20 to 40 dB, the impulse noise induced in the input amplifier and in the line connecting it to the receiver loop.

Key words: TEM sounding method, transmitter loop, common mode noise.

Измерительная система для импульсной индуктивной электроразведки включает источник прямоугольных импульсов тока, генераторную и приемную петли, измеритель (регистратор) и источники питания. В ряде случаев система может содержать линию синхронизации и/или кондуктор, т. е. линию, соединяющую приемную петлю и регистратор. Обычно полезным сигналом в методах импульсной индуктивной электроразведки (МПП, ЗСБ) является ЭДС, индуцируемая в приемной петле или рамке магнитным полем устанавливающихся в земле вихревых токов. Кроме полезного сигнала на входе измерительного блока аппаратуры присутствуют помехи. В зависимости от того, находится ли источник помех внутри измерительной системы или вне ее, они классифицируются как системные или внесистемные. К внесистемным относят помехи, индуцируемые в приемной петле и наводимые на кондуктор за счет естественного переменного электромагнитного поля и полей промышленных источников.

В статье рассматриваются системные помехи, связанные с переходными процессами тока и напряжения в генераторной петле.

Для возбуждения индукционных переходных процессов в земле в генераторную петлю подают прямоугольные импульсы тока. Простой формирователь прямоугольных импульсов тока в петле, импеданс Z которой в общем случае является комплексным и частотно-зависимым, образован цепью из последовательно включенных источника тока, ключа (транзистор, тиристор) и петли (рис. 1, *а*). Более совершенная мостовая схема (рис. 1, *б*) создает в петле импульсы тока чередующейся полярности, разделенные паузой, и характеризуется намного лучшей симметрией, чем схема на рис. 1, *а*.

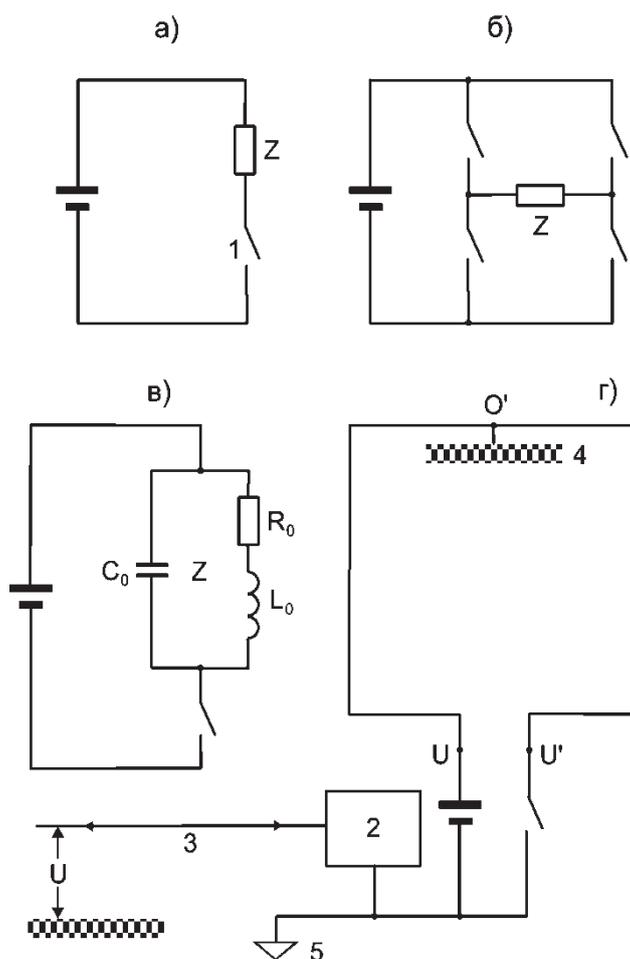


Рис. 1. Схема для формирования однополярных (*а*) и разнополярных (*б*) импульсов тока в генераторной петле; однополярный коммутатор тока, нагруженный на эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами (*в*) и реальную петлю (*г*):

1 – быстродействующий ключ (транзистор, тиристор); 2 – схема управления;
3 – линия синхронизации; 4 – земля; 5 – сигнальная земля

На рис. 1, *в* изображен однополярный коммутатор тока и генераторная петля, представленная в виде эквивалентного контура с сосредоточенными па-

раметрами – сопротивлением R_0 , индуктивностью L_0 и емкостью C_0 . После замыкания ключа в контуре возникнут затухающие колебания тока и напряжения. Последние через низкое сопротивление источника питания приложены к находящемуся в закрытом состоянии ключу и, если не предпринять специальных мер по защите от перенапряжений, могут привести к пробою ключа и вывести его из строя.

Понять, что происходит при выключении тока, позволяет представление генераторной петли в виде симметричной комбинации из двух длинных линий, образованных проводом петли и подстилающей его геологической средой [1, 2].

Согласно теории длинных линий [3], напряжение \dot{U}_1 на входных зажимах линии длиной l следующим образом связано с выходными напряжением \dot{U}_2 и током \dot{I}_2 : $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \dot{\gamma} l + \dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \dot{\gamma} l$, где $\dot{\gamma} = \alpha + j\beta$, α – коэффициент затухания, β – коэффициент фазы, \dot{Z}_B – волновое сопротивление линии.

Поскольку петлю можно представить в виде симметричной комбинации двух закороченных на выходе линий, $\dot{U}_2 = 0$, и, следовательно, $\dot{U}_1 = \dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \dot{\gamma} l$.

Применяя полученные соотношения к изображенной на рис. 1, ε петле, получаем: $\dot{U} = \dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \dot{\gamma} l$, $\dot{U}' = -\dot{I}_2 \dot{Z}_B \operatorname{sh} \dot{\gamma} l$.

В случае собственных колебаний тока и напряжения $\beta = \pi/2$. Поэтому, учитывая, что затухание α невелико, находим $\dot{U} = \dot{I}_2 \dot{Z}_B e^{j\frac{\pi}{2}}$, $\dot{U}' = -\dot{I}_2 \dot{Z}_B e^{j\frac{\pi}{2}}$.

Очевидно, напряжение между жазимами петли составляет:

$$\dot{U}_{12} = \dot{U} - \dot{U}' = 2\dot{I}_2 \dot{Z}_B e^{j\frac{\pi}{2}}.$$

Согласно последнему выражению, \dot{U}_{12} опережает по фазе колебания тока на $\pi/2$. На высоких частотах $Z_B \approx 150$ Ом [1]. Таким образом, если ток в точке провода, потенциал которой равен нулю (O' на рис. 1, ε), равен I , размах напряжения между жазимами генераторной петли составляет $300 I$.

Колебания напряжения на жазимах петли возбуждают в линии «кабель синхронизации – ВЧР» волны тока и напряжения. Поэтому потенциал сигнальной земли регистратора изменяется во времени. Если электрическая длина линии синхронизации невелика, потенциал сигнальной земли регистратора повторяет напряжение на жазимах петли. Кроме того, изменяющиеся во времени потенциалы U и U' через различные емкости создают наводки на приемную петлю, кондуктор, линию синхронизации и входные цепи регистратора.

На рис. 2 изображена схема, поясняющая пути распространения наводок в измерительной системе. Находящиеся под высокими переменными потенциалами U и U' разомкнутые концы петли через импедансы $Z_{ГК}$ и $Z'_{ГК}$ воздействуют на входные цепи регистратора, приемную петлю и линию, соединяющую

приемную петлю и измерительный блок аппаратуры (кондуктор). Другая наводка действует по линии синхронизации, импеданс которой на рис. 2 обозначен как $Z_{\text{ГИ}}$. Обычно импеданс $Z_{\text{ГИ}}$ стремятся сделать как можно больше, однако он вследствие емкостных связей между обмотками разделительного трансформатора, оптронами и другими элементами не бесконечен.

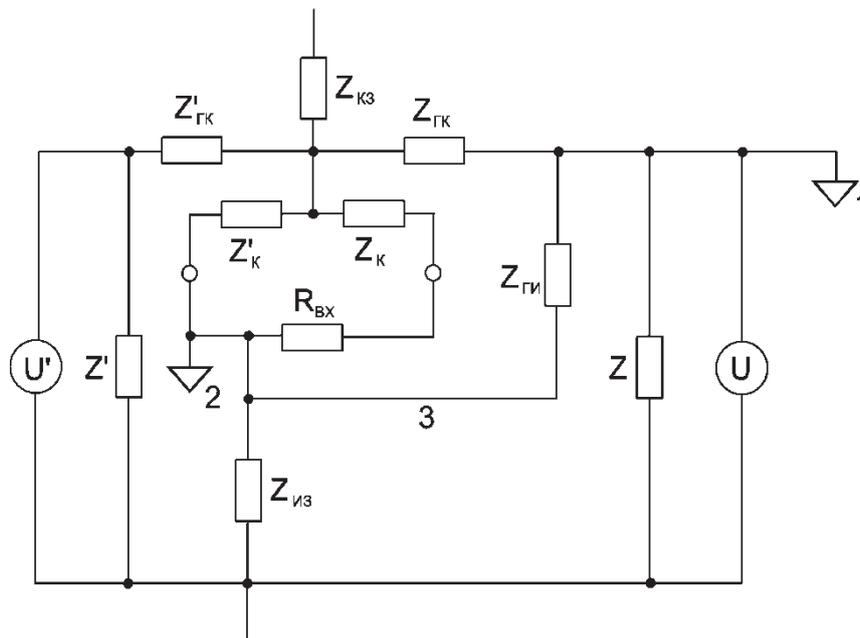


Рис. 2. Схема, поясняющая «пути» синфазных наводок в системе импульсной индуктивной электроразведки:

1 – сигнальная земля коммутатора тока; 2 – сигнальная земля измерителя; 3 – линия синхронизации; U, U' – эквивалентные источники напряжения (рис. 1, 2); Z, Z' – импедансы этих источников относительно земли; $Z_{\text{ГК}}, Z'_{\text{ГК}}$ – относительно кондуктора либо приемной петли; $Z_{\text{К}}, Z'_{\text{К}}$ – импедансы проводов кондуктора; $Z_{\text{КЗ}}$ – импеданс кондуктора относительно земли; $R_{\text{ВХ}}$ – входное сопротивление усилителя регистратора; $Z_{\text{ИЗ}}$ – импеданс сигнальной земли усилителя относительно земли; $Z_{\text{ГИ}}$ – импеданс между сигнальными землями коммутатора и регистратора

Рис. 3 иллюстрирует эксперимент по изучению воздействия потенциалов U и U' (см. рис. 1, 2) на входные цепи регистратора и приемный кондуктор. Размер генераторной петли из провода ГПМП составлял 200×200 м. В случае, показанном на рис. 3, а, генератор для ударного возбуждения высокочастотных колебаний тока и напряжения (2) располагался рядом с измерительным усилителем, к входу которого был подключен закороченный на дальнем конце кондуктор в виде витой пары из провода ПСРП длиной 300 м. Поскольку кондуктор закорочен, он представляет антенну, воспринимающую синфазную наводку. Осциллограмма напряжения, приведенного к входу усилителя, показана на рис. 3, б. Форма напряжения, размах которого составляет около 0,2 В, повторяет форму колебаний напряжения на зажимах петли.

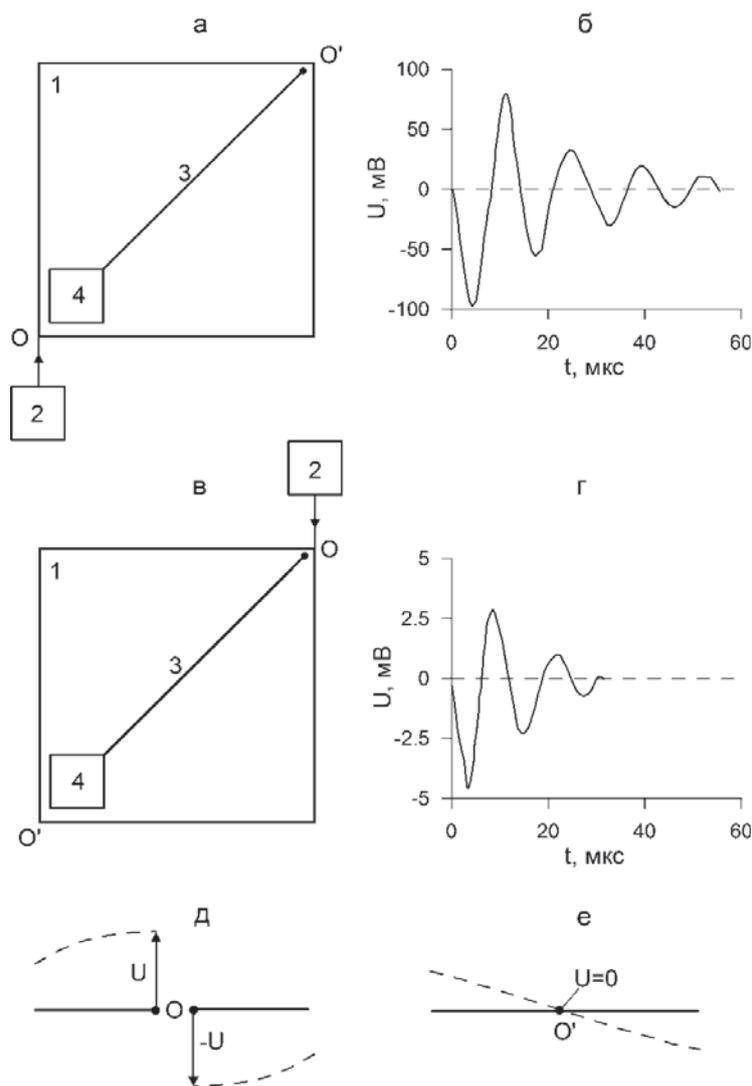


Рис. 3. Схемы наблюдений (а, в), осциллограммы синфазной наводки на кондуктор (б, г) и распределение потенциала вблизи точек О и О' (д, е):

1 – генераторная петля; 2 – генератор для ударного возбуждения высокочастотных колебаний; 3 – кондуктор; 4 – усилитель и осциллограф

Схема измерений на рис.3, в отличается от предыдущей местом подключения генератора высокочастотных колебаний. Приведенное к входу напряжение на выходе усилителя по форме по-прежнему совпадает с формой колебаний напряжения на зажимах генераторной петли, однако теперь его размах не превосходит 7 мВ, т. е. в 30 раз меньше, чем в первом случае (рис. 3, г). В обоих случаях изменение полярности подключения кондуктора к входу усилителя не влияет на выходной сигнал, т. е. причиной рассматриваемой системной помехи является синфазная наводка.

Результаты этих наблюдений легко понять, если обратиться к картине стоячих волн тока и напряжения в генераторной петле [1]. В точке О схемы на рис. 3, а наблюдаются пучности напряжения, которое создает сильную наводку на расположенные поблизости кондуктора, которые подключены к входу уси-

лителя с большим входным сопротивлением (рис. 3, *д*). При измерениях по схеме на рис. 3, *в* пучности напряжения в петле находятся рядом с закороченным концом кондуктора, а его конец, подключенный к входу усилителя, расположен вблизи точки O' с нулевым потенциалом (рис. 3, *е*). При этом синфазная наводка на кондуктор снижается в десятки раз.

Значение приведенных результатов для измерений на ранних временах иллюстрирует рис. 4. Традиционные схемы наблюдений с установками «петля в петле» и совмещенной изображены на рис. 4, *а*, *в* соответственно. На рис. 4, *б*, *г* показаны рекомендуемые варианты, использование которых позволит на 20–40 дБ снизить системные помехи, связанные с коммутацией тока. На рис. 4, *д*, *е* приведены картины стоячих волн, поясняющие возникновение системных коммутационных помех при работе по традиционной и предлагаемой методикам.

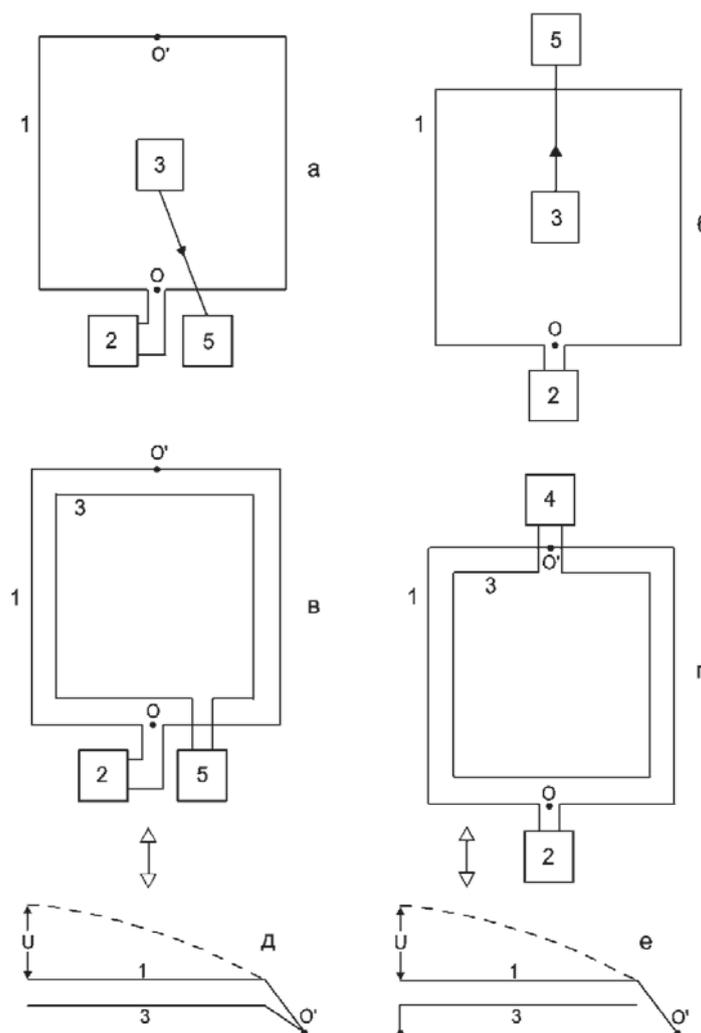


Рис. 4. Традиционные (*а*, *в*) и предлагаемые (*б*, *г*) схемы наблюдений; (*д*, *е*) генераторная и приемная петли, образующие совмещенную установку, как длинные линии:

1 – генераторная петля; 2 – коммутатор тока; 3 – приемная петля; 4 – кондуктор; 5 – измеритель

На основе модели системных помех, возникающих при выключении тока в генераторной петле, предложены рекомендации по снижению их влияния. В числе способов снижения влияния таких помех – увеличение импеданса $Z_{ги}$, тщательная гальваническая развязка между источником и приемником, симметрирование выходных цепей коммутатора тока и входных цепей регистратора. Анализ картины стоячих волн тока и напряжения в системе «генераторная петля – ВЧР» показывает, что действенным средством снижения уровня системных помех рассматриваемого вида является правильный выбор установки. В отличие от общепринятой схемы регистратор следует размещать не рядом с коммутатором тока на углу генераторной петли, а вблизи точки, где наблюдается узел стоячей волны напряжения. Эта точка равноудалена от зажимов петли, к которым подключен коммутатор тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozhevnikov N. O. Applying the transmission line theory to study ungrounded horizontal loop self-transients // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 222–233.
2. Kozhevnikov N. O. Current turn-off in an ungrounded horizontal loop: experiment and theory // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 498–505.
3. Simonyi K. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin // Theoretische Elektrotechnik. – 1956.

REFERENCES

1. Kozhevnikov N. O. Applying the transmission line theory to study ungrounded horizontal loop self-transients // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 222–233.
2. Kozhevnikov N. O. Current turn-off in an ungrounded horizontal loop: experiment and theory // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 498–505.
3. Simonyi K. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin // Theoretische Elektrotechnik. – 1956.

© Н. О. Кожевников, 2018