ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Интерэкспо ГЕО-Сибирь

Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология.

Материалы XVI международной научной конференции

ИНГГ СО РАН

Новосибирск

20-24 апреля, 2020

Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы XVI международной конференции (20-24 апреля 2020, Новосибирск) / Сетевое электронное издание. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. –Новосибирск. 2020. xxx с.

ISBN 978-5-4262-0102-6

doi: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020

Программный комитет:

Координаторы:
Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
Кондратенко Андрей Сергеевич, ИГД СО РАН, г. Новосибирск
Конторович Алексей Эмильевич, академик РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
Неволько Александр Иванович, начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск
Эпов Михаил Иванович, академик РАН, ИНГГ СО РАН, СНИИГГиМС, г. Новосибирск

Сопредседатели:
Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
Каширцев Владимир Аркадьевич, чл.-корр. РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
Филимонова Ирина Викторовна, д.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Секретари:
Комарова Анна Владимировна, к.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: KomarovaAV@ipgg.sbras.ru
Левичева Александра Викторовна, к.г-.м.н., СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru
Сурикова Екатерина Сергеевна, к.г.-м.н., СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: SurikovaES@ipgg.sbras.ru
Чеботарева Анастасия Владимировна, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: ChebotarevaAV@ipgg.sbras.ru
Шумскайте Мария Йоновна, к.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

Адрес оргкомитета: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН.
При поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Самостоятельное непериодическое локальное статичное научное сетевое электронное издание. Системные требования: наличие на устройстве ПО для просмотра PDF-файлов.

Статьи публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-4262-0102-6 © ИНГГ СО РАН, 2020

УДК 550.837 doi: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-045

ЗАМКНУТАЯ ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ПЕТЛЯ КАК ФИЛЬТР НИЗКИХ ЧАСТОТ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Николай Олегович Кожевников
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр–т Коптюга, 3, доктор геолого–минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383) 333–28–16, e–mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Обсуждается возможность использовать замкнутую горизонтальной петлю в методе переходных процессов для снижения уровня высокочастотных помех, индуцируемых в приемной петле. Выводятся выражения, показывающие, что частотная характеристика измерительной системы с учетом влияния дополнительной петли аналогична частотной характеристике фильтра низких частот. Для эффективного ослабления помехи необходимо располагать вспомогательную петлю как можно ближе к приемной.

Ключевые слова: Метод переходных процессов, помехи, замкнутая петля.

CLOSED HORIZONTAL WIRE LOOP AS A LOW–PASS FILTER IN TEM MEASURING SYSTEMS

Nikolay O. Kozhevnikov
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, 3, Koptyug Ave., Novosibirsk, Ph. D., Prof., Senior Scientist, phone: (383) 333–28–16, e–mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the possibility of using a closed horizontal loop in a TEM measuring system to reduce the external high–frequency electromagnetic noise induced in a receiving loop. It is shown that the effect of an additional loop on the frequency response of the TEM measuring system is similar to that of a low–pass filter. In order to effectively reduce external noise, one should locate the auxiliary loop as close as possible to the receiver one.

Key words: TEM sounding method, noise, closed loop.

Введение

Замкнутая горизонтальная петля применяется для тестирования измерительных систем для метода переходных процессов [2]. Кроме этого, замкнутая петля снижает амплитуду импульса ЭДС, воздействующего на приемный тракт аппаратуры во время выключения тока в генераторной петле. Благодаря этому устраняется перегрузка входного усилителя, которая приводит к искажениям переходной характеристики как на ранних, так и на поздних временах [4].

В работе [3] рассмотрено применение замкнутого витка для экранирования высокочастотного переменного магнитного поля в радиоустройствах. Это наводит на мысль, что замкнутая петля может найти применение в индуктивной электроразведке в качестве фильтра для снижения уровня внешних (внесистемных) помех. В отличие от аналоговых фильтров на дискретных компонентах или интегральных схемах, «встроенных» в измерительную аппаратуру, замкнутая петля не имеет гальванической и емкостной связей с приемной петлей и измерителем. Поэтому можно ожидать, что применение такого фильтра позволит улучшить качество измерений по сравнению с тем, которое достигается при использовании обычных аналоговых фильтров.

В статье рассматривается влияние, которое замкнутая петля оказывает на уровень внешних высокочастотных помех в приемной петле.

Общая схема измерений

На рис. 1 показана общая схема измерений в методе переходных процессов.

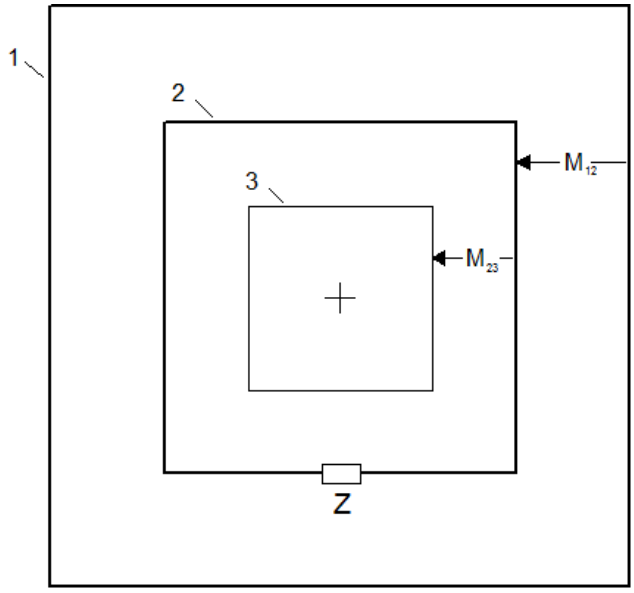

Рис. 1. Общая схема измерений: 1 – генераторная петля; 2 – дополнительная петля и подключенная к ней цепочка с комплексным сопротивлением *Z*; 3 – приемная петля. Каждая из петель индуктивно связана с другими

Fig. 1. Measurement set–up (a general view): 1 – transmitter loop; 2 – an additional (auxiliary) loop and a circuit with complex resistance *Z*; 3 – receiving loop. Each of the loops is inductively coupled to the others

Установка для зондирований методом переходных процессов, включает генераторную (1) и приемную (3) петли, а также дополнительную петлю (2). Петля 2 подключена к цепочке в виде катушки с индуктивностью L и резистора с сопротивлением R, соединенных последовательно. Связь между петлями характеризуется коэффициентами взаимной индукции M_{12} (генераторная петля – дополнительная петля), M_{23} (дополнительная петля – приемная петля) и M_{13} (генераторная петля – приемная петля).

Основные положения

ЭДС электромагнитных помех равна скорости изменения потока магнитного поля, пронизывающего приемную петлю. Предположим, что частота помехи равна ω, а амплитуда вертикальной составляющей магнитного поля помехи в пределах контуров приемной и дополнительной петель равна B_{Z0}. В момент времени t вертикальная компонента магнитного поля помехи $B_Z(t)$ равна $B_{Z0}e^{i\omega t}$ (где i – мнимая единица), а поток магнитного поля помехи через петлю $\Phi_{33}= B_{Z0}S_3e^{i\omega t}$, где S_3 – площадь приемной петли.

Обозначим ЭДС помехи в приемной петле e_{33}. Очевидно,

$$e_{33} = -d\Phi_{33}/dt = -i\omega B_{Z0}S_3e^{i\omega t}$$

Аналогично, ЭДС, индуцируемая магнитным полем помехи в дополнительной петле:

$$e_{22} = -d\Phi_{22}/dt = -i\omega B_{Z0}S_2e^{i\omega t}$$

Под действием ЭДС e_{22} в дополнительной петле протекает ток:

$$I_2 = \frac{e_{22}}{Z} = -\frac{i\omega B_0 S_2 e^{i\omega t}}{R + i\omega L}.$$

Изменяющийся во времени ток I_2 индуцирует в приемной петле ЭДС

$$e_{32} = -M_{23}\frac{dI_2}{dt} = M_{23}\frac{\omega^2 B_0 S_2 e^{i\omega t}}{R + i\omega L}.$$

Обозначим e_3 суммарную ЭДС, наводимую в приемной петле магнитным полем помехи и током во вспомогательной петле. После несложных преобразований находим, что

$$e_3 = e_{33} + e_{32} = e_{33}\left(1 - \frac{iM_{23}\omega S_2}{(R + i\omega L)S_3}\right).$$

Отношение e_3/e_{33} показывает, насколько результирующая ЭДС помехи с частотой ω отличается от исходной, т.е. индуцируемой в приемной петле, когда дополнительная петля отсутствует:

$$\frac{e_3}{e_{33}} = 1 - \frac{i\omega M_{23} S_2}{(R + i\omega L)S_3}. \qquad (1)$$

Обозначим это отношение K(ω); очевидно, в случае полного подавления помехи K=0; если ослабления помехи не происходит, K=1.

Пример расчетов

На примере приемной петли размером 50м х 50м рассмотрим, как модуль $K(\omega)$ изменяется в зависимости от параметров вспомогательной петли (рис.2).

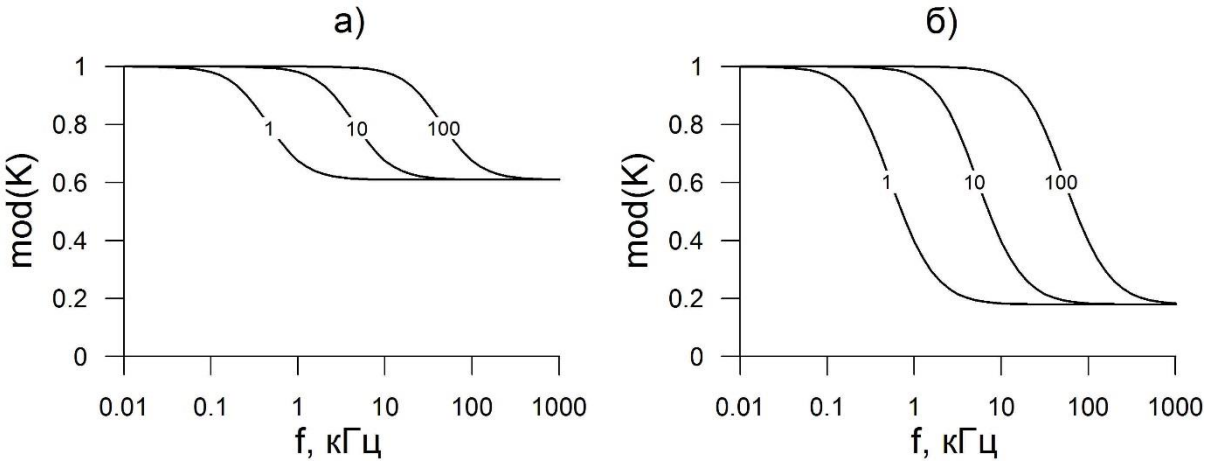

Рис. 2. Модуль коэффициента ослабления помехи в приемной петле размером 50м х 50м зависимости от частоты. Длина стороны дополнительной петли: 49.00м (а) и 49.99м (б). Шифр графиков – сопротивление R (Ом) резистора, подключенного к дополнительной петле

Fig. 2. Frequency dependence of the attenuation factor for the 50m by 50m receiving loop. The side length of the auxiliary loop is 49.00m (a) and 49.99m (b). The figures on the graphs indicate the resistance R (ohm) of the resistor connected to the auxiliary loop

Графики на рис. 2 рассчитаны для значений R =1, 10 и 100 Ом и индуктивности L, равной собственной индуктивности вспомогательной петли 2. Как видно, в диапазоне низких частот, который тем шире, чем больше R, модуль

K(ω) равен единице, т.е. уровень помехи в приемной петле такой же, как и при отсутствии петли 2. При повышении частоты модуль K(ω) уменьшается и, в конце концов, приближается к асимптотическому значению, меньшему единицы.

Таким образом, дополнительная петля действует как фильтр низких частот (ФНЧ), частота среза которого тем выше, чем больше сопротивление резистора R. Поэтому благодаря использованию дополнительной петли можно снизить уровень высокочастотных помех в приемной петле.

Чем меньше модуль K(ω) на высоких частотах, тем сильнее подавляется помеха. Сравнение графиков на рис. 2а и 2б показывает, что сближение контуров вспомогательной и приемной петель приводит к повышению эффективности экранирования. Так, когда расстояние между контурами (проводами) приемной и вспомогательной петель составляет 50см (рис. 2а), модуль K(ω) на высоких частотах равен 0.6, а при расстоянии 0.5см – 0.18.

Рассмотрим более подробно высокочастотную помеху. В этом случае индуктивное сопротивление вспомогательной петли намного больше активного (ωL>>R), и выражение (1) принимает вид

$$K = \frac{e_3}{e_{33}} = 1 - \frac{M_{23} S_2}{L S_3}.$$

Полное ослабление помехи (K=0) происходит при выполнении условия:

$$\frac{M_{23} S_2}{L S_3} = 1,$$

для чего необходимо совместить петли, так как в этом случае $S_2=S_3$, и $M_{23}=L$.

Влияние длины стороны l_2 вспомогательной петли на модуль K (случай высокочастотной помехи) иллюстрирует рис. 3, где видно, как по мере сближения приемной и вспомогательной петель снижается уровень помехи. Поэтому для существенного снижения уровня помехи вспомогательная петля должна располагаться как можно ближе к приемной.

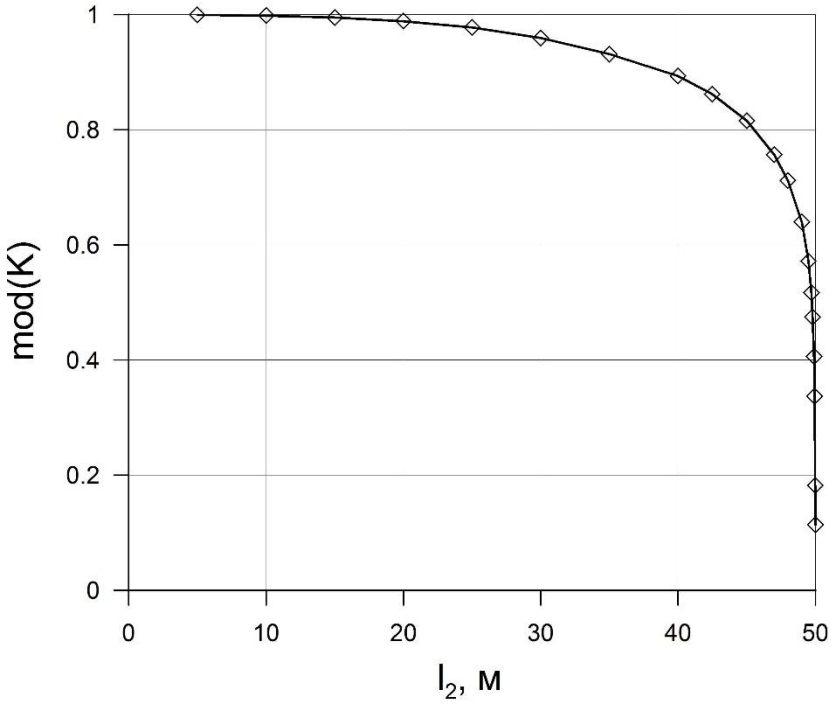

Рис. 3. График, иллюстрирующий зависимость модуля коэффициента ослабления высокочастотной помехи от длины стороны вспомогательной петли (l_2). Размер приемной петли – 50м х 50м

Fig. 3. A graph illustrating the dependence of the high–frequency noise attenuation on the side length (l_2) of the auxiliary loop. The receiving loop size is 50m by 50m

Как показывает опыт работ методом переходных процессов, приемную и вспомогательную возможно расположить таким образом, что расстояние между их контурами составляет около 1 см. При этом (см. рис. 3) mod(K)≈0.2, т.е. высокочастотная помеха ослабляется примерно в пять раз.

Обсуждение результатов и выводы

Применение дополнительной петли в методе переходных процессов позволяет в несколько раз снизить ЭДС высокочастотной монохроматической помехи, индуцируемой в приемной петле. Помехи такого вида создаются устройствами радиосвязи, телефонными и релейными линями, промышленными установками и т.п. Однако чаще высокочастотные помехи являются широкополосными [5]. В этом случае ЭДС $e_{33}(t)$ помехи, индуцируемой в приемной петле (без учета влияния дополнительной петли), определяется выражением

$$e_{33}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_{33}(\omega)e^{i\omega t}d\omega,$$

где $S_{33}(\omega)$ – спектр помехи.

Коэффициент $K(\omega)$ служит множителем пропорциональности между спектральными плотностями помехи с учетом и без учета дополнительной петли. Поэтому [1, с. 301]

$$e_3(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(\omega)S_{33}(\omega)e^{i\omega t}d\omega,$$

откуда видно, что в произвольный момент времени ЭДС помехи уменьшается в $e_{33}(t)/e_3(t)$ раз.

При практической реализации рассматриваемого способа фильтрации может возникнуть проблема, связанная с тем, что при выключении тока в источнике 1 в замкнутой петле 2 (см. рис. 1) возникает ток $I_2(t)$, убывающий по экспоненте с постоянной времени $\tau_2=L/R$ [Кожевников, 2012]. Поскольку петля 2 индуктивно связана с приемной петлей 3, в последней наводится экспоненциально убывающая ЭДС, которая накладывается на ЭДС, наводимую в приемной петле при затухании вихревых токов в земле. Оптимальный режим измерений достигается за счет подбора такой постоянной времени, при котором происходит существенное снижение уровня внесистемных высокочастотных помех, а влияние системной помехи остается в пределах допустимого.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 18–05–00363 «Математическое моделирование и экспериментальное изучение индукционных переходных процессов тока в замкнутой горизонтальной петле с учетом влияния подстилающей среды».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1983. – 356 с.

2. Кожевников Н.О. Переходный процесс в петле и его использование при оценке измерительной системы для импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика. – 2012. – т. 53. – №11. – С. 1614 – 1627.

3. Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. – Л.: Энергия, 1969. – 112 с.

4. Kozhevnikov N., Sharlov M. Early–Time and Late–Time Limitations on the Performance of Near–Surface TEM Measuring Systems // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: conference proceedings (8–12 September 2019, The Hague, Netherlands). – The Hague, Netherlands, 2019. – 4 p.

5. Macnae J. C., Lamontagne Y., and West G. F. Noise processing techniques for time–domain EM systems // Geophysics. – 1984. – Vol. 49. –P. 934–948.

REFERENCES

1. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie czepi i signaly. – M.: Vy`sshaya shkola, 1983. – 356 s.

2. Kozhevnikov N.O. Perekhodny`j proczess v petle i ego ispol`zovanie pri oczenke izmeritel`noj sistemy` dlya impul`snoj induktivnoj e`lektrorazvedki // Geologiya i geofizika. –2012. –t. 53. – №11. – S. 1614 – 1627.

3. Roginsky Roginskij V.Yu. E`kranirovanie v radioustrojstvakh. – L.: E`nergiya, 1969. – 112 s.

1. Kozhevnikov N., Sharlov M. Early–Time and Late–Time Limitations on the Performance of Near–Surface TEM Measuring Systems // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: conference proceedings (8–12 September 2019, The Hague, Netherlands). – The Hague, Netherlands, 2019. – 4 p.

2. Macnae J. C., Lamontagne Y., and West G. F. Noise processing techniques for time–domain EM systems // Geophysics. – 1984. – Vol. 49. – P. 934–948.

© Н.О. Кожевников 2020