

УДК 621.3

ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ НА МНОГОПРОВОДНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

С.Ю.ТОКАРЕВ

ФГБОУВПО «Ивановский Государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: tokarev@rza.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Используемые в инженерной практике методики расчета параметров многопроводных линий не уделяют достаточное внимание влиянию конечной проводимости земли в высокочастотной области, что является причиной погрешностей при расчете волновых процессов.

Материалы и методы: Методом с использованием аналитических функций Бесселя, аппроксимации интеграла Карсона и других с учетом конечной проводимости и диэлектрической проницаемости земли исследовались параметры линий электропередач.

Результаты: Производится аналитическое и численное сравнение результатов с учетом и без учета влияния токов смещения в земле. Исследуются параметры линии в широком частотном диапазоне при различных значениях проводимости и диэлектрической проницаемости земли.

Выводы: Рассмотренные выражения точной аппроксимации влияния земли рекомендуется использовать для расчета в широкой полосе частот.

Ключевые слова: возврат через землю, сопротивление земли, ток смещения в земле, высокочастотная зависимость, асимптотическое поведение, воздушные линии, многопроводные линии, земляной канал, нулевая последовательность, параметры почвы, релейная защита, волновой процесс, верификация модели, погодные условия, метод конечных элементов.

INFLUENCE OF GROUND FINITE CONDUCTIVITY ON MULTIWIRE LINES OF ELECTRIC POWER TRANSMISSION

S.Yu. TOKAREV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tokarev@rza.ru

Abstract

Background: Practical engineering approaches for calculating parameters of multiwire transmission lines at high frequency area do not pay much attention to the influence of ground finite conductivity. It may cause an error in calculations of wave processes.

Materials and methods: The author researches the parameters of electric power lines with the usage of the method of Bessel analytical functions, approximation of Carson's integral and others including the finite conductivity and dielectric capacity of ground.

Results: The author carries out the analytical and numerical comparison of results with the influence of electric induction currents in ground as well as without them. The parameters of lines in wide frequency range in different values of conductivity and dielectric penetration of ground are considered.

Conclusions: In the article it is recommended to use the expressions of accurate approximation of ground influence for calculating in wide range of frequencies.

Key words: return through ground, ground resistance, displacement current in the ground, high frequency dependence, asymptotic nature, multiconductor overhead circuits, multiwire lines, ground mode, zero sequence, soil parameters, relaying protection, wave process, verification of model, weather conditions, finite element method.

Введение. Современные задачи электроэнергетики предъявляют высокие требования к точности учета параметров многопроводных линий не только на промышленной частоте, но и в значительно более высокой частотной области. Такие требования в первую очередь обосновываются появлением передовых алгоритмов релейной защиты и автоматики, базирующихся на явлении конечной скорости распространения высокочастотных волновых процессов в многопроводных линиях.

Электромагнитная волна, распространяясь вдоль линии электропередачи, наводит индуцированные токи (поверхностный эффект) в земле. Потери энергии волны на создание этих токов определяются как геометрическими параметрами системы проводов, так и параметрами грунта. В симметричной системе координат этому явлению (возврату через землю) соответствует нулевая последовательность, а в модальной – земляной канал.

Частотная зависимость. Исследования в области учета влияния конечной проводимости земли показывают высокую степень зависимости этого явления от частоты электромагнитного поля [7, с. 24]. Этот факт значительно усложняет исследование волновых переходных процессов во временной области [7, с. 42].

Аналитическое решение. Влияние конечной проводимости земли в частотной области при ее представлении однородной *полубесконечной* плоскостью с эквивалентной глубиной проникновения (рис. 1) может быть представлено с помощью аналитических выражений [7, с. 33]:

$$Z_{земли}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-(2h_i)\vartheta}}{\sqrt{\vartheta^2 + \gamma_{земли}^2}} d\vartheta; \quad (1)$$

$$Z_{земли}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \times \int_0^\infty \frac{e^{-(h_i+h_j)\vartheta}}{\sqrt{\vartheta^2 + \gamma_{земли}^2}} \cos(d_{ij}\vartheta) d\vartheta, \quad (2)$$

где

$$\gamma_{земли}(j\omega) = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_{земли}(\sigma_{земли} + j\omega \cdot \epsilon_0\epsilon_{земли})}; \quad (3)$$

$\sigma_{земли}$ – проводимость земли, См/м; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; $\mu_{земли}$ – относительная магнитная проницаемость; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; $\epsilon_{земли}$ – относительная диэлектрическая проницаемость; h_i – высота подвеса i -го провода над землей, м; d_{ij} – горизонтальное расстояние между i -м и j -м проводами, м (рис. 1).

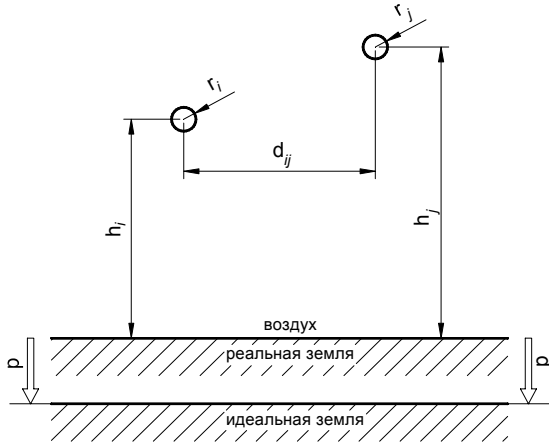


Рис. 1. Эквивалентная глубина проникновения волн относительно поверхности земли

Выражения (1), (2) представлены в виде несобственных интегралов. Их точное решение может быть получено с использованием функций Бесселя первого и второго родов [7, с. 31]. Решение этих функций, в свою очередь, представляется в виде рядов. Такое представление не очень удобно для практических инженерных расчетов. Поэтому обычно его

упрощают путем использования только первых членов рядов и исключением из рассмотрения тока смещения в земле [2, с. 131–132]. Как показывают расчеты [3], такой подход демонстрирует отличную точность в низкочастотной области и неудовлетворительную точность в высокочастотной.

Более рациональным видится подход к упрощению решения выражений (1), (2) аппроксимируемыми [7, с. 33–34] элементарными функциями комплексного аргумента:

$$Z_{земли}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1 + h_i \gamma_{земли}}{h_i \gamma_{земли}} \right); \quad (4)$$

$$Z_{земли}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \times \ln \left(\frac{\left[1 + \frac{\gamma_{земли}(h_i + h_j)}{2} \right]^2 + \left[\frac{\gamma_{земли} d_{ij}}{2} \right]^2}{\left[\frac{\gamma_{земли}(h_i + h_j)}{2} \right]^2 + \left[\frac{\gamma_{земли} d_{ij}}{2} \right]^2} \right). \quad (5)$$

Выражения (4), (5) точно согласуются во всем диапазоне частот [3] с выражениями (1), (2) соответственно. По этой причине они видятся полноправными кандидатами на замещение используемых лишь только для низкочастотной области выражений [2, с. 131–132].

Комплексная глубина проникновения. Методологически влияние, вносимое конечной проводимостью земли, необходимо относить к внешнему сопротивлению многопроводной линии. Таким образом, внешнее сопротивление этой линии должно включать в себя и сопротивление земли. Выражения для этого могут быть получены исходя из предположения, что возврат через землю осуществляется через некую идеально проводящую плоскость [6]. Эта плоскость должна располагаться на некой фиктивной глубине (рис. 1), соответствующей комплексной глубине проникновения плоских волн относительно поверхности земли (рис. 2):

$$\rho(j\omega) = \frac{1}{\gamma_{земли}(j\omega)}. \quad (6)$$

С физической точки зрения эта глубина соответствует «уровню нулевого потенциала» под поверхностью земли [1, с. 28]. В низкочастотной области модуль этой величины (для характерных показателей проводимости грунта) значительно превосходит высоты подвеса проводов фаз над землей (рис. 2). В высокочастотной же области эта величина стремиться к поверхности земли (поле почти не проникает в землю).

Действительно, при уменьшении удельной проводимости земли (увеличении удельного сопротивления земли) возврат через землю будет осуществляться на большей глубине [1, с. 27]. Что, собственно, и соответствует явлению увеличения потерь в земле.

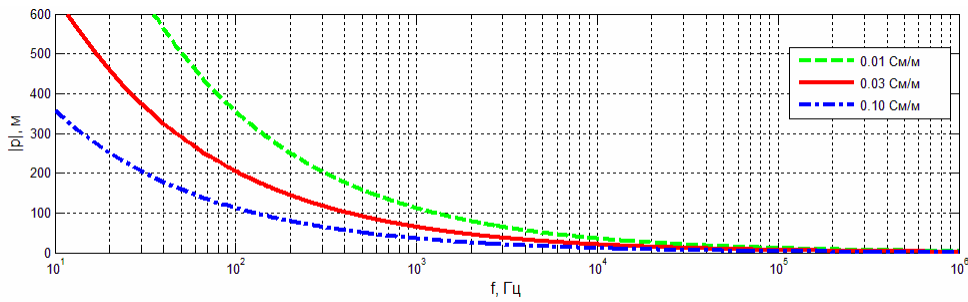


Рис. 2. Зависимости модуля комплексной глубины проникновения плоских волн в землю от частоты при различных проводимостях земли (по выражению (6) без учета тока смещения в земле)

Кроме того, непосредственно из выражения (6) может быть получена эквивалентная глубина проникновения:

$$\delta(j\omega) = (1 + j)\rho(j\omega). \quad (7)$$

Таким образом, подставив выражение (6) в подынтегральные функции выражений (1), (2), можно разложить последние выражения в ряд. Взяв, скажем, только первый член такого ряда, можно произвести интегрирование. После чего полученное выражение можно совместить с выражением для внешнего сопротивления провода. Тогда внешнее сопротивление многопроводной системы, находящейся над поверхностью, имеющей конечную проводимость земли, можно представить следующими выражениями:

$$Z_{\text{внешнее}}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[2 \frac{h_i + \rho(j\omega)}{r_i} \right]; \quad (8)$$

$$Z_{\text{внешнее}}(j\omega)_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \times \ln \left(\frac{[h_i + h_j + 2 \cdot \rho(j\omega)]^2 + [d_{ij}]^2}{[h_i - h_j]^2 + [d_{ij}]^2} \right). \quad (9)$$

Эти выражения показывают высокую точность, только когда высота подвеса провода над землей много больше расстояния между фазами. Такое соотношение выполняется всегда для используемых в электроэнергетике типов опор. В случаях, когда, например, необходимо рассматривать влияние ЛЭП на линии связи, данное соотношение обычно не выполняется. Погрешность при этом может достигать 15 % [5]. Для ее уменьшения требуется использовать аппроксимацию подынтегральных функций в выражениях (1), (2) не только первыми членами ряда [6], но и хотя бы вторыми [5]. Погрешность в этом случае не будет превышать 2,5 %.

Высокочастотная область. Особый интерес вызывает исследование поведения выражений (1), (2) с ростом частоты. На очень высоких частотах действительная глубина проникновения плоских волн в землю (7) становится конечной величиной [7, с. 34]:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta(j\omega) = \frac{2}{\sigma_{\text{земли}}} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{земли}}}{\mu_0 \mu_{\text{земли}}}}. \quad (10)$$

Следовательно, сопротивление земли (4), (5) в этом случае тоже принимает некое конечное значение. Причем мнимая часть этих выражений обратится в нуль, а действительная примет асимптотическое значение [7, с. 35]:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{\text{земли}}(j\omega)_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot h_i} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{\text{земли}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{земли}}}}; \quad (11)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_{\text{земли}}(j\omega)_{ij} = \frac{h_i + h_j}{\pi [(h_i + h_j)^2 + d_{ij}^2]} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{\text{земли}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{земли}}}}. \quad (12)$$

Отметим, что при устремлении частоты в бесконечность прямой расчет численными методами выражений (1), (2), в отличие от аппроксимирующих выражений (4), (5), может не всегда сходиться. Кроме того, в этой области частот начинает сказываться влияние тока смещения в земле. При его исключении из рассмотрения выражения (1), (2) обращаются в бесконечность, а величина (7) – в нуль [7, с. 34–35], что противоречит (11), (12).

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

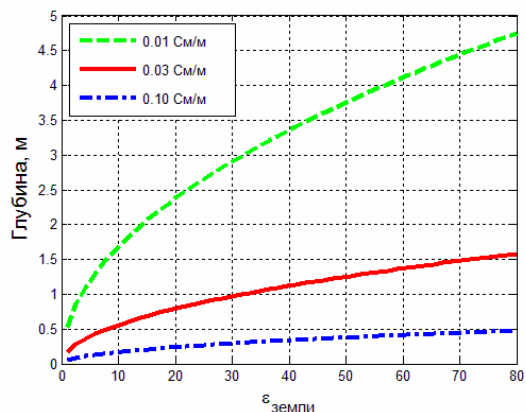


Рис. 3. Зависимости эквивалентной глубины проникновения плоских волн в землю от диэлектрической проницаемости при различных проводимостях земли (на очень высоких частотах)

Ток смещения в земле. Одним из принципиальных ограничений использования низкочастотных методов [2, с. 131–132] является пренебрежение учетом влияния тока смещения. Очевидно, что такое допущение оправдано тогда и только тогда, когда ток про-

водимости в земле значительно превышает ток смещения. В этом случае, в зависимости от соотношения конкретных параметров земли (проводимости $\sigma_{земли}$ и относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{земли}$), можно выделить некую *критическую частоту* [8]:

$$f_{критическая} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{земли}}{\epsilon_0 \epsilon_{земли}} \quad (13)$$

Относительно этой частоты можно выделить несколько характерных зон поведения земли (см. таблицу).

Таким образом, методологически в низкочастотной области (например, для расчета уставок релейной защиты) допустимость пренебрежения током смещения вполне оправдана. В высокочастотной же области (например, для корректного расчета деформации электромагнитных волн) учет тока смещения обязателен.

Сравнительный анализ. Особый интерес вызывает численное сравнение описанных выше методик {1: (4)–(5); 2: (8)–(9), 3: [2, с. 131–132]; 4: (1)–(2); 5: (11)–(12)} в широком диапазоне частот для типовой линии

{ $h_1 = 14,3$ м; $h_2 = 18,9$ м; $h_3 = 14,3$ м; $d_{12} = 0$ м; $d_{13} = 4,6$ м; $d_{23} = 4,6$ м} и характерных параметров грунта { $\sigma_{земли} = 0,01$ См/м; $\epsilon_{земли} = 80$; $\mu_{земли} = 1$ }.

Отметим, что в методике 2 сопротивление земли получается после вычета уз указанных выражений внешнего сопротивления линии. Численный расчет несобственных интегралов в методике 4 осуществляется с помощью *адаптивного алгоритма Гаусса-Кронрода*.

В низкочастотной области все методики показывают сопоставимые результаты как для прямой последовательности (рис. 5), так и для нулевой (рис. 6).

В высокочастотной области начинает сказываться влияние тока смещения. По этой причине не учитывающая этот фактор методика 3 показывает неудовлетворительные результаты как для прямой последовательности (рис. 7), так и для нулевой (рис. 8). Методика 2 хоть и учитывает ток смещения, но в сверхвысокочастотной области показывает значительные погрешности.

Характерные зоны поведения земли

Характерная зона	Нижняя граница зоны	Верхняя граница зоны	Отношение тока смещения к току проводимости	Пояснение
I	0	$0,1 \cdot f_{критическая}$	Незначительное	Можно пренебрегать током смещения
II	$0,1 \cdot f_{критическая}$	$2,0 \cdot f_{критическая}$	Соизмеримое	Ни током смещения, ни током проводимости пренебрегать нельзя
III	$2,0 \cdot f_{критическая}$	∞	Доминирующее	Можно пренебрегать током проводимости

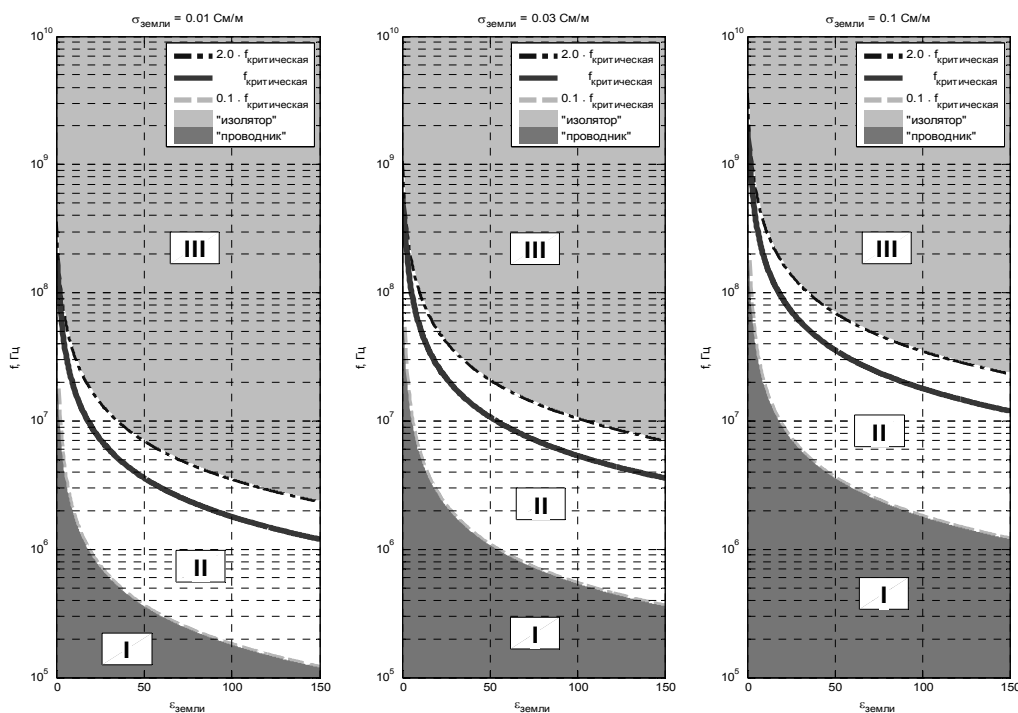


Рис. 4. Характерные зоны поведения земли при различных показателях $\sigma_{земли}$ (см. таблицу)

Действительно, согласно выражениям (11), (12), сопротивление земли при устремлении частоты в бесконечность должно принимать некое асимптотическое значение ($Z_1 = 0,012 \text{ Ом/м}$, $Z_0 = 1,269 \text{ Ом/м}$).

Параметры земли. Точные значения параметров земли, включая информацию о структуре слоев (особенно актуально этот вопрос ставится для районов Крайнего Севера), в подавляющем большинстве случаев отсутствуют [7, с. 36]. Экспериментальное получение значений этих параметров является достаточ-

но трудоемкой задачей [9, 10]. Такое состояние дел вносит значительные трудности в саму теоретическую возможность получения достаточно точного результата.

Таким образом, использование (см. таблицу) критерия необходимости учета тока смещения в земле может выступать значительным подспорьем при постановке вопроса об обоснованности проведения изысканий подобного рода для определения $\epsilon_{\text{земли}}$.

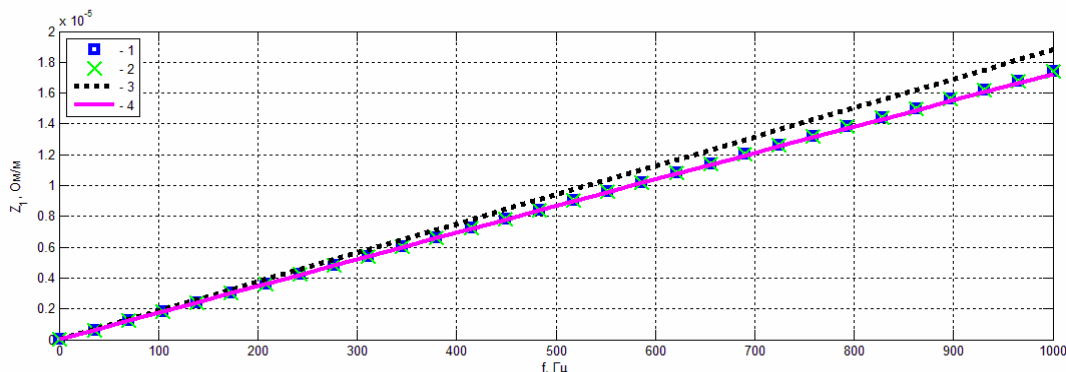


Рис. 5. Сопротивление прямой последовательности земли в низкочастотной области

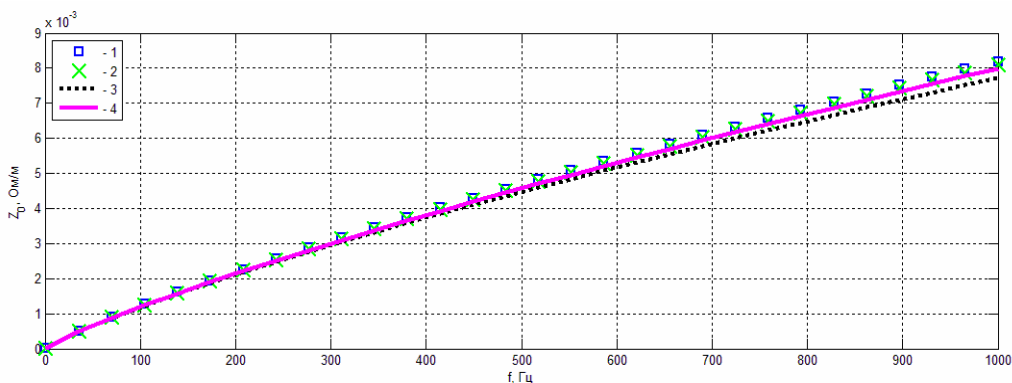


Рис. 6. Сопротивление нулевой последовательности земли в низкочастотной области

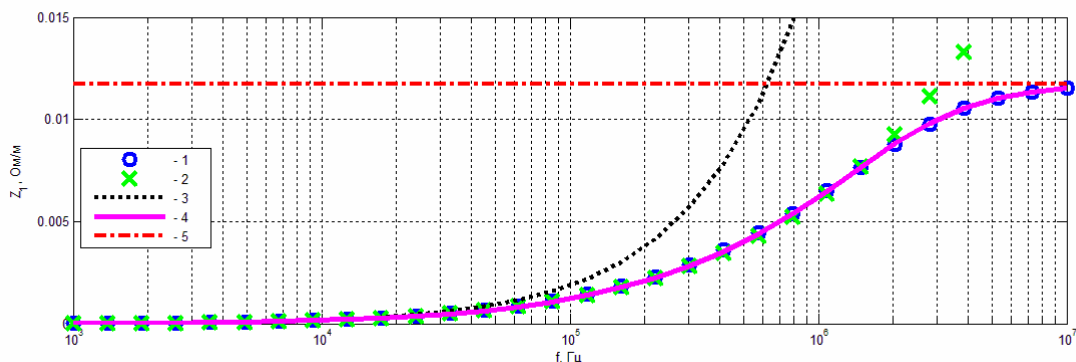


Рис. 7. Сопротивление прямой последовательности земли в высокочастотной области

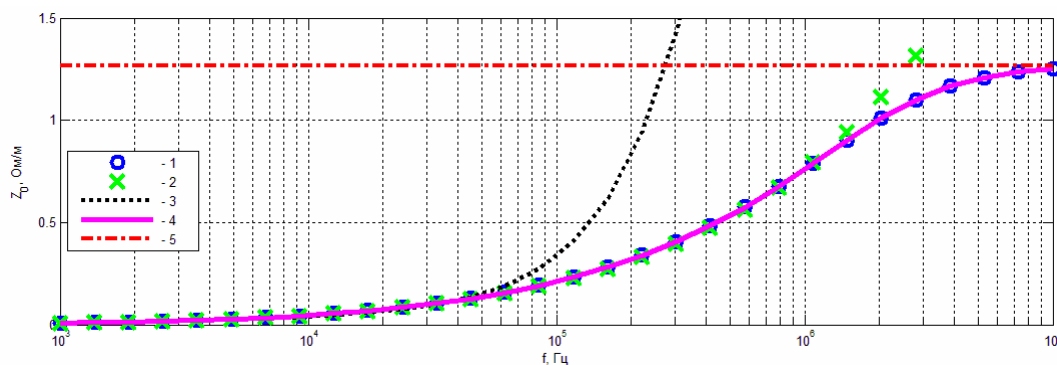


Рис. 8. Сопротивление нулевой последовательности земли в высокочастотной области

Сложный рельеф местности. В ряде имеющих место на практике случаях (например, линия проходит параллельно водоему или скальному образованию) поверхность земли не может быть представлена однородной полубесконечной плоскостью. Поэтому рассмотренные выше аналитические методы учета явления конечной проводимости земли (4), (5) не применимы. В данном случае необходимо использовать гораздо более ресурсоёмкие численные методы расчетов (например, *метод конечных элементов*).

Влияние погоды. Помимо этого параметры земли имеют сильную зависимость от погодных условий [4, с. 119]. По этой причине параметры линии не могут приниматься одними и теми же для всех погодных условий. Необходима оперативная корректировка расчетной модели линии при изменении погоды.

Верификация. Рассмотренные методики учета конечной проводимости земли являются лишь первым, требующим последовательных уточнений приближением [11, с. 3] влияния различных факторов для каждой частотной составляющей. Действительно, имея в наличии достаточное количество измерений при ярко выраженном наличии рассматриваемого фактора (например, наличие осадков или низкая температура окружающей среды), можно произвести статистическую оценку влияния этого фактора на точность модели. Это в дальнейшем позволит оперативно вносить корректировку в модель при ярком проявлении конкретного фактора.

Заключение

Влияние конечной проводимости земли является сложной функцией частоты. Несмотря на это, аналитические выражения, описывающие это явление для однородной полубесконечной плоскости, могут быть представлены в достаточно простой форме (4), (5). Кроме того, эти аналитические выражения в форме (8), (9) представляют достаточно наглядную физическую интерпретацию явления возврата через землю. Для сложного рельефа местно-

сти необходимо использовать уже более сложные, численные, методы.

Учет влияния тока смещения в земле позволяет использовать эти выражения для анализа высокочастотных процессов распространения электромагнитных волн в многопроводных линиях.

Очевидно, что влияние таких факторов, как погодные явления или присущие определенным частотным полосам специфические явления поляризации, обратного рассеяния и резонанса [9], представить в виде относительно простых зависимостей не представляется возможным. Поэтому приведенные выше аналитические выражения могут выступать лишь первым приближением для последующих уточнений влияния обозначенных факторов.

Список литературы

1. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973.
2. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750кВ. – М.: Энергия, 1979.
3. Токарев С.Ю., Лебедев В.Д. Анализ методов определения первичных параметров ЛЭП с учетом влияния земли: тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». В 3 т. Т.3. – М.: МЭИ, 2011. – С. 372–373.
4. Шкарин Ю.П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи. Ч. 1. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001 [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 7(31)].
5. Alvarado F.L., Betancourt R. An accurate closed-form approximation for ground return impedance calculations // Proceedings of the IEEE. – 1983. – Vol. 71(2). – P. 279–280.
6. Deri A., Tevan G. Mathematical verification of Dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation // Archiv für Elektrotechnik. – Budapest, 1981. – No.63. – P. 191–198.
7. **Electromagnetic** field interaction with transmission lines: From Classical Theory to HF Radiation Effects / F. Rachidi, S. Tkachenko, (editors.). – Boston: WIT Press, 2008.
8. Semlyen A. Ground return parameters of transmission lines an asymptotic analysis for very high frequencies // IEEE Trans. On Power Systems. – 1981. – Vol. 100. – No. 3. – P. 1031–1038.
9. Portela C.M., Gertrudes J.B., Tavares M.C., Pissolato F.J. Earth Conductivity and Permittivity Data Measurements – Influence in Transmission Line Transient Performance // Electric Power Systems Research. – 2006. – Vol. 76. – P. 907–915.

10. Portela C.M., Tavares M.C., Pissolato J. Influence of earth conductivity and permittivity frequency dependence in electromagnetic transient phenomena: Proc. Intern. Conf. Pow. Syst. Trans (IPST2001). – Rio de Janeiro, Brazil, 2001. – P. 19–24.

11. Power System Transients: Parameter Determination / Juan A. Martinez-Velasco (editor). – CRC Press, 2009.

References

1. Kostenko, M.C., Perel'man, L.S., Shkarin, Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Waves Processes and Electrical Disturbances on High Voltage Multiconductor Transmission Lines], Moscow: Energiya, 1973.

2. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite «Raschety tokov korotkogo замыкания для releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110–750 kV»* [Guidelines on Protective Relaying «Fault Current Calculation for Protective Relaying and Automation System in Networks of 110–750 kV»], issue 11, Moscow: Energiya, 1979.

3. Tokarev, S.Yu., Lebedev, V.D. Analiz metodov opredeleniya pervichnykh parametrov LEP s uchedom vliyaniya zemli [Analysis of Investigation Approaches of Initial Parameters of Electric Transmission Lines with Ground Influence] in *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XVII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Radioelectronics and Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Science and

Technical Conference of Students and Post-graduate Students], vol. 3, Moscow: MPEI, 2011, pp. 372–373.

4. Shkarin, Yu.P. *Vysokochastotnye trakty kanalov svyazi po liniyam elektroperedachi* [Carrier Links of Communication Channels in High Frequency Transmission Lines], vol. 1, Moscow: NTF «Energoprogress», 2001.

5. Alvarado, F.L., Betancourt, R. An accurate closed-form approximation for ground return impedance calculations, in Proceedings of the IEEE, 1983, vol. 71(2), pp. 279–280.

6. Deri, A., Tevan, G. Mathematical verification of Dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation, in Archiv für Elektrotechnik, Budapest, 1981, no. 63, pp. 191–198.

7. Electromagnetic field interaction with transmission lines: From Classical Theory to HF Radiation Effects, Boston: WIT Press, 2008.

8. Semlyen, A. Ground return parameters of transmission lines as an asymptotic analysis for very high frequencies, in IEEE Trans. On Power Systems, 1981, vol. 100, no. 3, pp. 1031–1038.

9. Portela, C.M., Gertrudes J.B., Tavares M.C., Pissolato F.J. Earth Conductivity and Permittivity Data Measurements – Influence in Transmission Line Transient Performance, in Electric Power Systems Research, 2006, vol. 76, pp. 907–915.

10. Portela, C.M., Tavares, M.C., Pissolato, J. Influence of earth conductivity and permittivity frequency dependence in electromagnetic transient phenomena, in Proc. Intern. Conf. Pow.Syst.Trans (IPST2001), Rio de Janeiro, Brazil, pp. 19–24.

11. Power System Transients: Parameter Determination / Juan A. Martinez-Velasco (editor), CRC Press, 2009.

Токарев Сергей Юрьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский Государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

аспирант,

e-mail: tokarev@rza.ru