

Научная статья
УДК 621.317.3
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.007

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА

Евгения Дмитриевна Бороздина

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, e.borozdina@ksc.ru*

Аннотация

При полевых измерениях электрических параметров грунта на частотах от сотен кГц до нескольких МГц существуют нежелательные электромагнитные эффекты. Эти эффекты вносят значительную ошибку в измеряемое удельное сопротивление грунта. В работе показано, как проявляются высокочастотные эффекты в зависимости от глубины исследования и параметров грунта. Для этого создана расчетная модель с использованием четырехэлектродной установки с перпендикулярным расположением токовых и потенциальных электродов. Расчеты выполнены для различных размеров установки. Рассматривались как однородная, так и многослойные модели грунта. Результаты расчетов сравнивались с рассчитанными аналитическим способом. Показано, что влияние электромагнитных эффектов увеличивается с глубиной исследования и частотой сигнала.

Ключевые слова:

удельное сопротивление грунта, метод конечных разностей во временной области, высокочастотные эффекты

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Original article

HIGH-FREQUENCY EFFECTS IN FIELD MEASUREMENTS OF FREQUENCY-DEPENDENT SOIL PROPERTIES

Evgeniya D. Borozdina

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e.borozdina@ksc.ru*

Abstract

Field measurements of the frequency-dependent soil electrical properties at high frequencies (from 100 kHz up to several MHz) can be affected by unwanted electromagnetic effects. These effects can lead to significant errors in soil resistivity measurements. In this work the high-frequency effects are demonstrated. For this, the simulation model was developed based on the finite-difference time-domain method. Soil properties were calculated using the perpendicular dipole-dipole array. Different array dimensions, as well as uniform and multilayered soil models were considered. Simulation results are compared with those calculated analytically. It was shown that the electromagnetic effects increase with the depth of investigation and excitation frequency.

Keywords:

soil resistivity, finite difference time domain (FDTD) method, high-frequency electromagnetic effects

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

Введение

Измерение и моделирование электрических параметров грунта (удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости) в частотном диапазоне, характерном для токов молний, имеют большое значение при изучении электромагнитных переходных процессов в энергосистемах и проектировании систем заземления. Есть много работ, в которых показана необходимость учета частотной зависимости параметров грунта, например, при расчете импульсных характеристик заземлителей [1–3].

Полевые измерения в широком диапазоне частот проводятся для того, чтобы уточнять и подтверждать частотно-зависимые модели грунта. Поэтому важно избегать ошибок при измерениях. Большинство ошибок, по крайней мере на низких частотах, можно избежать, используя подходящий метод измерений, например, как в [4]. Четырехэлектродный метод позволяет избавиться от приэлектродных эффектов (поляризации) и контактного сопротивления, характерного, например, для метода с полусферой [5]. Причем диполи следует располагать перпендикулярно, чтобы обеспечить низкую электромагнитную связь между измерительными цепями [6], что особенно важно, когда измерения проводятся на частотах порядка нескольких МГц.

Для данного метода измерений, впрочем, как и для других известных методов, характерно существование нежелательных электромагнитных эффектов. Эти эффекты носят емкостный и индуктивный характер. Емкостные эффекты подобны тем, что были описаны в лабораторных измерениях в [7]. Паразитная индуктивность возникает из-за самоиндукции электромагнитного поля в приповерхностной области грунта при протекании тока по проводам, соединяющим электроды и источник тока (напряжения), ее величина пропорциональна проводимости грунта, частоте и квадрату длины потенциального провода [8].

В [3] было показано, что на частотах от 100 кГц и выше электромагнитные эффекты могут вносить существенную ошибку в измеряемое удельное сопротивление грунта. Также было отмечено, что их величина зависит от глубины исследования. Глубина же зависит от геометрических параметров установки.

Цель данной работы заключается в том, чтобы оценить влияние высокочастотных электромагнитных эффектов на результаты измерений в зависимости от глубины исследования в частотном диапазоне от 100 кГц до 4 МГц. Для этого были проведены расчеты для различных расстояний между диполями четырехэлектродной установки на одно-, двух- и трехслойных моделях грунта. Рассматривались только вертикальные неоднородности.

Методы

Оценить влияние высокочастотных эффектов удобно с помощью расчетных методов, поскольку можно провести множество расчетов для различных параметров установки и грунта, что в полевых условиях было бы затруднительно. Для расчетов использовался метод конечных разностей во временной области (finite difference time domain (FDTD) method) [9].

Типичная установка для полевых измерений частотно-зависимых параметров грунта с перпендикулярным расположением питающих и измерительных электродов приведена на рис. 1, а. На рис. 1, б изображен вид расчетной модели сверху.

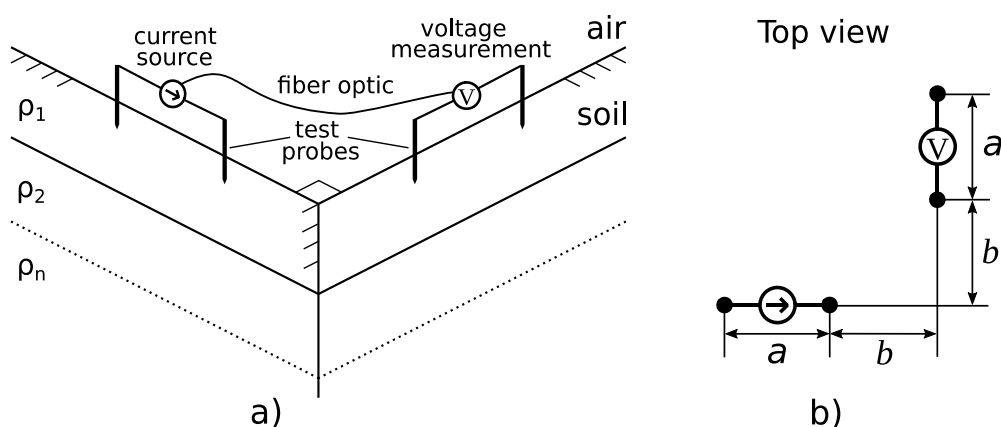


Рис. 1. Четырехэлектродный метод с перпендикулярным расположением диполей:
а — типичная установка для полевых измерений; б — расчетная модель (вид сверху)

Fig. 1. Four electrode method with perpendicular dipole-dipole arrangement:
a — typical field measurement setup; b — calculation model (top view)

Диаметр проводников и электродов равен 3 и 8 мм соответственно. Электроды погружены на одну ячейку в грунт. Для обеспечения высокой точности расчетов размер ячейки расчетной сетки в большинстве случаев принимался 0,05 м. В отдельных случаях, когда размер расчетной области сильно увеличивался из-за размера установки или количества слоев грунта, ячейка увеличивалась до 0,125 м, чтобы сократить время расчетов. Проводники располагаются на высоте трех или одной ячейки от поверхности грунта в зависимости от размера ячейки.

Импульс тока моделируется с помощью функции Хейдлера [10]. Для отражения волн от границ расчетной области используются поглощающие граничные условия CPML [9] толщиной 10 ячеек. Время расчетного процесса составляет 400 мкс.

Параметры грунта моделируются с помощью функции Дебая [11]. Для моделирования частотной зависимости в работе используется модель Alipio — Visacro [12]. Для данной модели подбирались параметры функции Дебая, и затем эта функция применялась в FDTD расчетах. Для каждого ρ_0 задается своя функция. ρ_0 — это удельное сопротивление грунта, измеренное на низкой частоте (обычно 100 Гц) или на постоянном токе [13].

Все расчеты в данной работе выполнены с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом [14]. Там же можно найти подробную информацию о том, как задаются параметры модели.

Оценка влияния высокочастотных эффектов

Чтобы убедиться в корректности FDTD модели, сравним результаты вычислений с заданными изначально по модели Alipio — Visacro (AV).

На рисунке 2 приведены результаты расчетов для установки с размерами $a = 1$ м и $b = 1,25$ м (см. рис. 1, *b*). Низкочастотное удельное сопротивление грунта 250, 1000 и 9000 Ом·м.

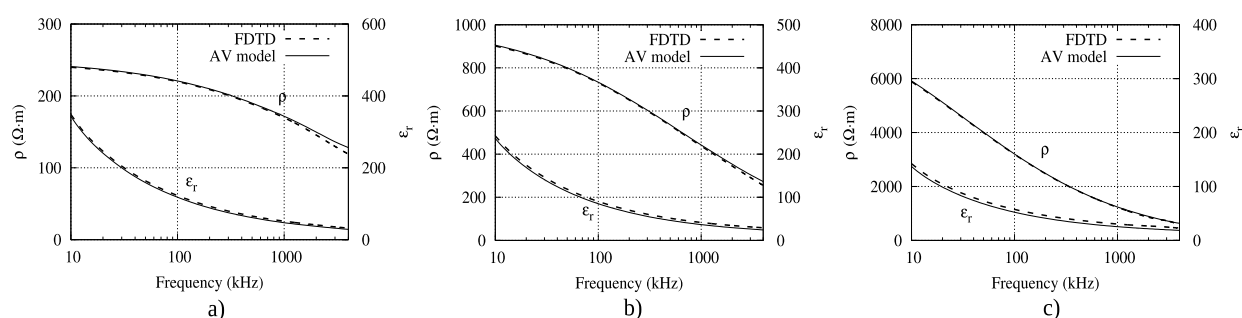


Рис. 2. Результаты расчетов для однородного грунта, $a = 1$ м, $b = 1,25$ м:

a — $\rho_0 = 250$ Ом·м; b — $\rho_0 = 1000$ Ом·м; c — $\rho_0 = 9000$ Ом·м

Fig. 2. Calculation results for the uniform soil models, $a = 1$ m and $b = 1.25$ m for all cases:

a — $\rho_0 = 250$ Ω·m; b — $\rho_0 = 1000$ Ω·m; c — $\rho_0 = 9000$ Ω·m

Размер ячейки сетки FDTD 0,05 м. Количество членов Дебая равно 7, в дальнейших расчетах оно будет сокращено до 4, чтобы сократить время вычислений (точность вычислений при этом не изменится).

Из графиков видно, что рассчитанные значения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости методом FDTD практически идеально совпадают с заданными изначально во всём диапазоне частот. Высокочастотных эффектов при этом не наблюдается.

Далее, используя эти же параметры грунта, проведем расчеты, увеличивая расстояние между диполями b , чтобы продемонстрировать высокочастотные эффекты. Длина диполей a во всех случаях не превышает 1 м, чтобы избежать нежелательных емкостных эффектов между электродами [7].

Однородный грунт

На рисунке 3 показаны результаты расчетов для трех случаев, когда расстояние между диполями b равно 6, 7 и 8 м. Размер ячейки FDTD 0,05 м.

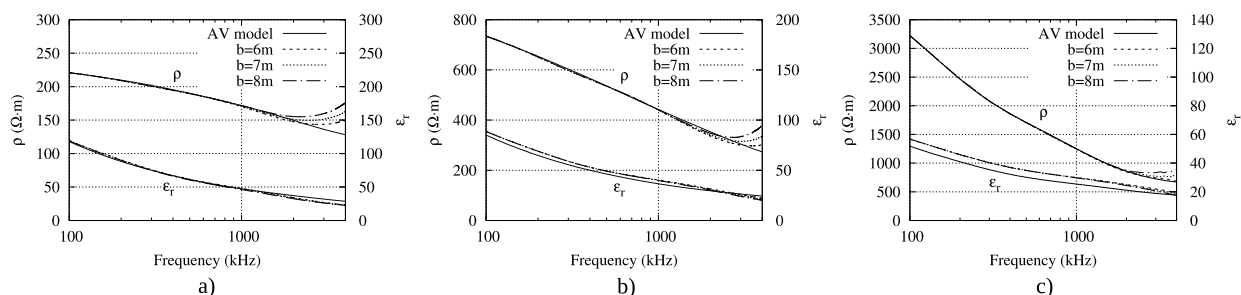


Рис. 3. Результаты расчетов для однородного грунта, $a = 1$ м для всех установок:

a — $\rho_0 = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; b — $\rho_0 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; c — $\rho_0 = 9000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Fig. 3. Calculation results for the uniform soil models, $a = 1$ m for all arrays:

a — $\rho_0 = 250 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; b — $\rho_0 = 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; c — $\rho_0 = 9000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

Видно, что результаты расчетов методом FDTD не совпадают с заданными. С частоты порядка 1 МГц электромагнитные эффекты вносят ошибку в удельное сопротивление. Влияние электромагнитных эффектов становится более очевидным с увеличением дистанции между диполями.

Можно отметить, что по мере увеличения удельного сопротивления грунта электромагнитные эффекты также влияют на относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r , причем во всём диапазоне частот.

Поскольку в реальности грунт чаще всего неоднородный и измеряемое удельное сопротивление является кажущимся, то корректнее использовать многослойные модели для расчетов.

Многослойная модель

Рассчитаем кажущееся удельное сопротивление грунта для двухслойных моделей аналитически с помощью метода, предложенного в [15], и сравним результаты расчетов с полученными методом FDTD. Для всех многослойных моделей размер ячейки FDTD принимался 0,125 м.

На рисунке 4, a , b , c представлены результаты расчетов для расстояний между диполями b 3,5; 4,25 и 6 м. Рис. 4, d соответствуют расстояния b 1,25; 2 и 6 м. Соответствующие медианные значения глубины исследования сведены в табл. 1. Подробнее о том, как рассчитывается глубина исследования для установок с перпендикулярным расположением диполей, говорится в [16]. Расчеты проведены для четырех моделей грунта, описание которых дано в табл. 2.

Недостатком используемого аналитического метода является то, что он не учитывает электромагнитных эффектов, поэтому на графиках видно несоответствие результатов с рассчитанными методом FDTD. Очевидно, что для оценки электромагнитных эффектов метод FDTD точнее, хотя и требует гораздо больше вычислительных ресурсов.

Можно видеть, что для моделей с более низкоомным верхним слоем ошибка в удельном сопротивлении появляется с частоты порядка 100 кГц, увеличиваясь с частотой и глубиной исследования. Причем от толщины верхнего проводящего слоя зависит величина этой ошибки. Например, для модели с толщиной верхнего слоя 2 м (см. рис. 4, a) ошибка на глубине 1,59 м менее выражена, чем для той же модели с толщиной верхнего слоя 0,75 м (см. рис. 4, b).

Для модели с более высокоомным верхним слоем (см. рис. 4, d) ошибка наблюдается в диапазоне от 10 кГц до 4 МГц даже на небольшой глубине 0,67 м. Однако в реальной практике такие грунты встречаются нечасто.

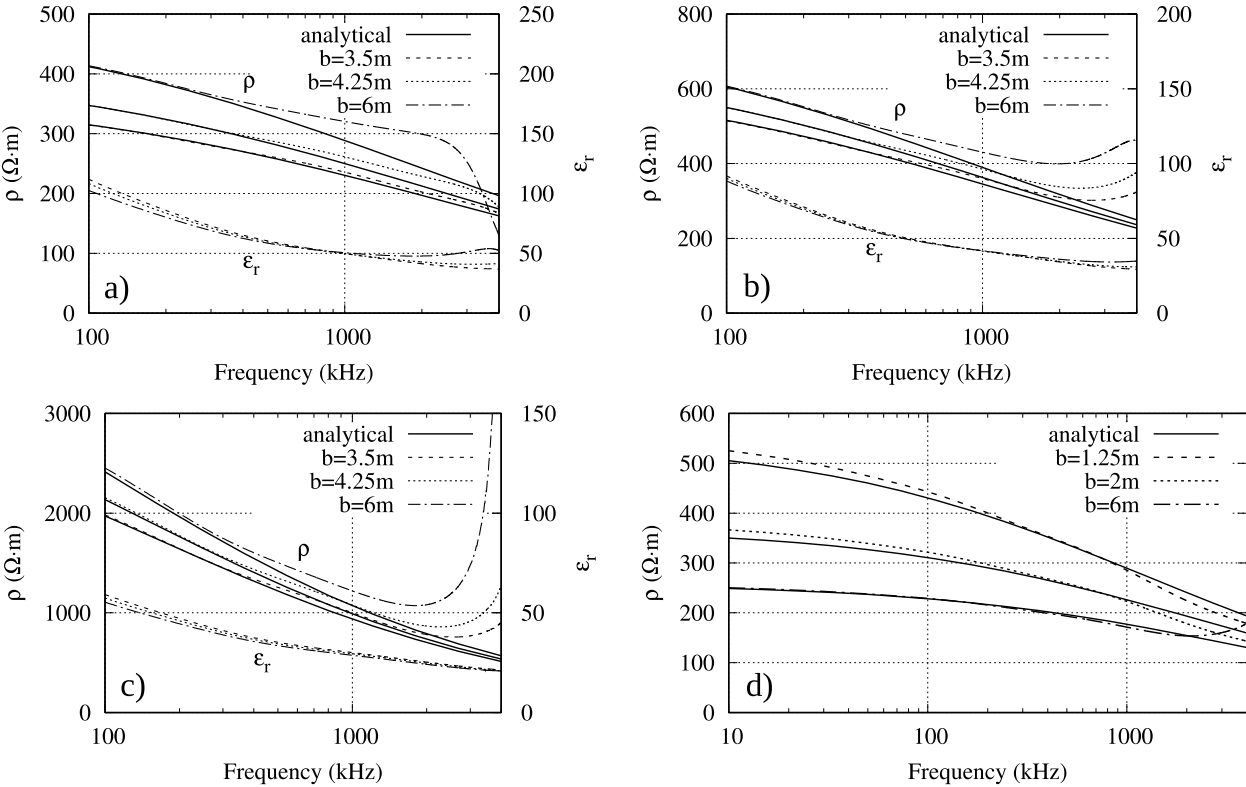


Рис. 4. Результаты расчетов для двухслойных моделей грунта
Fig. 4. Calculation results for the two-layer soil models

Таблица 1

Значения глубины исследования для рассматриваемых установок
Depth of Investigation (DOI) values for the considered dipole-dipole arrays

a (м)	1	1	1	1	1	1
b (м)	1,25	2	3	3,5	4,25	6
DOI (м)	0,67	0,77	1,38	1,59	1,89	2,59

Таблица 2

Параметры грунта
Soil parameters

Модель грунта	Сопротивление, Ом·м		Толщина верхнего слоя, м
	верхнего слоя	нижнего слоя	
a)	250	1000	2
b)	250	1000	0,75
c)	1000	9000	0,75
d)	1000	250	0,75

Высокочастотные эффекты могут быть объяснены не только особенностями измерительной установки, но и задержкой распространения электромагнитных волн в земле. Время задержки распространения обусловлено изменением электрических свойств среды, а именно диэлектрической проницаемостью грунта.

Проведем расчеты для трехслойной модели грунта. Сопротивление верхнего слоя 250 Ом·м, среднего — 1000 Ом·м и нижнего — 9000 Ом·м. Толщина верхнего и среднего слоев 0,75 м. Расстояние между диполями 3; 3,5; 4,25 и 6 м. Соответствующие им значения глубины исследования указаны в табл. 1. Рассчитанные значения кажущегося удельного сопротивления грунта показаны на рис. 5.

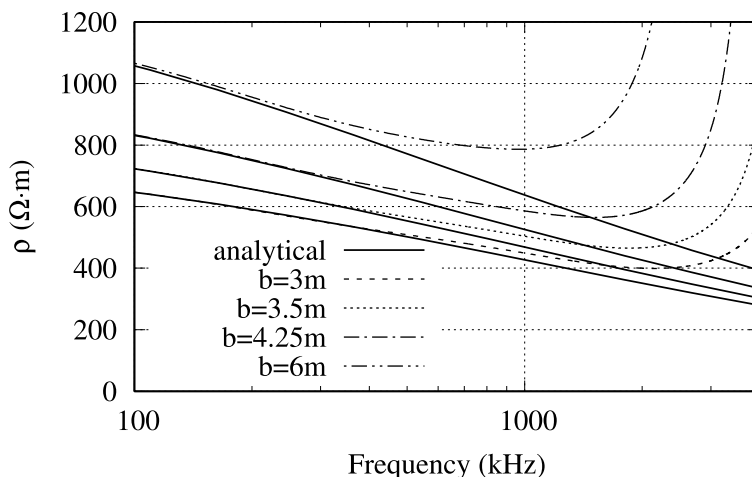


Рис. 5. Результаты расчетов для трехслойной модели грунта
Fig. 5. Calculation results for the three-layer soil model

Видно, что ошибка на высоких частотах значительна уже на глубине 1,38 м. Можно сделать вывод, что влияние высокочастотных эффектов на результаты измерений сильно зависит от параметров грунта.

Заключение

В работе были продемонстрированы высокочастотные эффекты, которые влияют на точность измеряемого удельного сопротивления грунта в полевых условиях. С помощью расчетов показано, что по мере увеличения расстояния между диполями (то есть глубины исследования) влияние электромагнитных эффектов усиливается в частотном диапазоне от 100 кГц до 4 МГц.

Чтобы обеспечить высокую точность измерений электрических параметров грунта на высоких частотах, необходимо ограничивать глубину исследования, как уже было отмечено в [3]. Для слоистых грунтов со значительной разницей между слоями стоит ограничиться глубиной примерно 1 м. Глубину исследования можно увеличить примерно до 1,5 м при условии, если грунт низкоомный и толщина верхнего слоя превышает глубину исследования (либо разница между слоями незначительна).

Еще одним возможным решением проблемы ошибок на больших глубинах может быть ограничение частотного диапазона до сотен кГц.

Список источников

1. Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results / S. Visacro [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57, No. 1. P. 121–127.
2. Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes / M. Nazari [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. Vol. 63, No. 1. P. 134–144.

3. Kuklin D. The Impact of apparent frequency-dependent soil properties on electrical grounding Characteristics // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2022. Vol. 64, No. 6. P. 2122–2130.
4. Kuklin D. Device for the field measurements of frequency-dependent soil properties in the frequency range of lightning currents // *Review of Scientific Instruments*. 2020. Vol. 91, No. 11, Art. no. 114701.
5. Visacro S., Alipio R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes // *IEEE Trans. Power Del.* 2012. Vol. 27, No. 2. P. 927–935.
6. Kuklin D. Numerical analysis of electromagnetic coupling effects in measurements of frequency dependent soil electrical properties // *Prog. Electromagn. Res. M.* 2019. Vol. 79. P. 101–111.
7. Kuklin D. FDTD analysis of the laboratory measurement setup for measurements of frequency-dependent soil properties // *Electr. Power Syst. Res.* 2024. Vol. 229, Art. no. 110187.
8. Dey A., Morrison H. F. Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered earth // *Geophysics*. 1973. Vol. 38, No. 2. P. 380–405.
9. Taflov A., Hagness S. C. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
10. Heidler F., Cvetic J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front // *European Transactions on Electrical Power*. 2002. Vol. 12, No. 2. P. 141–150.
11. Kelley D. F., Destan T. J., Luebbers R. J. Debye function expansions of complex permittivity using a hybrid particle swarm-least squares optimization approach // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55, No. 7. P. 1999–2005.
12. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2014. Vol. 56, No. 5. P. 1163–1171.
13. Kuklin D., Borozdina E. Estimation of errors related to usage of low-frequency resistivity in measurements of complex soil permittivity // *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*. 2023. P. 1–5.
14. Kuklin D. Open-source software for electrical engineering applications requiring consideration of electrodynamics: Elecode // *GitLab*. URL: <https://gitlab.com/dmika/elecode> (дата обращения: 05.05.2024).
15. Takahashi T., Kawase T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure // *IEEE Trans. Power Del.* 1990. Vol. 5, No. 2. P. 604–612.
16. Roy A. Depth of investigation in wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods // *Geophysical Prospecting*. 1972. Vol. 20, No. 2. P. 329–340.

References

1. Visacro S., Alipio R., Pereira C., Guimaraes M., Schroeder M. A. O. Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, Vol. 57, No. 1, pp. 121–127.
2. Nazari M., Moini R., Fortin S., Dawalibi F. P., Rachidi F. Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, Vol. 63, No. 1, pp. 134–144.
3. Kuklin D. The Impact of apparent frequency-dependent soil properties on electrical grounding Characteristics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, Vol. 64, No. 6, pp. 2122–2130.
4. Kuklin D. Device for the field measurements of frequency-dependent soil properties in the frequency range of lightning currents. *Review of Scientific Instruments*, 2020, Vol. 91, No. 11, art. no. 114701.
5. Visacro S., Alipio R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Trans. Power Del.*, 2012, Vol. 27, No. 2, pp. 927–935.
6. Kuklin D. Numerical analysis of electromagnetic coupling effects in measurements of frequency dependent soil electrical properties. *Prog. Electromagn. Res. M.*, 2019, Vol. 79, pp. 101–111.
7. Kuklin D. FDTD analysis of the laboratory measurement setup for measurements of frequency-dependent soil properties. *Electr. Power Syst. Res.*, 2024, Vol. 229, art. no. 110187.

8. Dey A., Morrison H. F. Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered earth. *Geophysics*, 1973, Vol. 38, No. 2, pp. 380–405.
9. Taflov A., Hagness S. C. *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*. Norwood, MA, USA, Artech House, 2005.
10. Heidler, F., Cvetic J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European Transactions on Electrical Power*, 2002, Vol. 12, No. 2, pp. 141–150.
11. Kelley D. F., Destan T. J., Luebbers R. J. Debye function expansions of complex permittivity using a hybrid particle swarm-least squares optimization approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, Vol. 55, No. 7, pp. 1999–2005.
12. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, Vol. 56, No. 5, pp. 1163–1171.
13. Kuklin D., Borozdina E. Estimation of errors related to usage of low-frequency resistivity in measurements of complex soil permittivity. *2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)*, 2023, pp. 1–5.
14. Kuklin D. Open-source software for electrical engineering applications requiring consideration of electrodynamics: Elecode. GitLab. Available at: <https://gitlab.com/dmika/elecode> (accessed 05.05.2024).
15. Takahashi T., Kawase T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure. *IEEE Trans. Power Del.*, 1990, Vol. 5, No. 2, pp. 604–612.
16. Roy A. Depth of investigation in wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, 1972, Vol. 20, No. 2, pp. 329–340.

Информация об авторе

Е. Д. Бороздина — инженер.

Information about the author

E. D. Borozdina — Engineer.

Статья поступила в редакцию 16.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.
The article was submitted 16.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.