

## Влияние расположения токового и потенциального контуров на результаты расчетов импульсных характеристик протяженного заземлителя

При измерениях и расчетах импульсных характеристик заземлителей часто используют токовый и потенциальный проводники для введения тока в заземлитель и измерения его потенциала соответственно. Результаты таких расчетов и измерений могут зависеть от расположения токового и потенциального проводников вследствие взаимного влияния между ними и проводником заземлителя. Необходимо выяснить, в какой степени расположение контуров влияет на расчеты с заземлителем простой формы. Причем, в отличие от измерений, при расчетах токовый и потенциальный контуры возможно располагать в том числе и вертикально, а также заменять потенциальный контур интегралом электрического поля. Для расчетов был использован метод конечных разностей во временной области. Для того чтобы оценить, в какой степени рассчитанное напряжение на заземлителе (соответственно и его сопротивление) может зависеть от расположения токового и потенциального контуров, были проведены расчеты с различным взаимным расположением контуров. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов. Существуют методы расчета, в которых ввод тока в заземлитель и расчет его потенциала могут производиться без токового и потенциального проводников. Одним из таких методов является метод, основанный на телеграфных уравнениях. Для того чтобы определить, какое расположение токового и потенциального контуров при расчетах методом конечных разностей во временной области будет соответствовать расчетам методом, основанным на телеграфных уравнениях, было проведено сравнение результатов расчетов двумя методами. По результатам расчетов можно заключить, что рассчитанные переходные характеристики в различной степени зависят от таких факторов, как расположение токового и потенциального контуров, замена потенциального контура расчетом интеграла электрического поля, параметры грунта. Расположение токового или потенциального контуров над заземлителем резко снижает значение рассчитанного напряжения на заземлителе. При перпендикулярном расположении токового, потенциального и заземленного проводников результаты расчета соответствуют тем, что были получены при помощи метода, основанного на телеграфных уравнениях.

**Ключевые слова:** метод FDTD, импульсное сопротивление, напряжение на заземлителе, заземление.

### Введение

Результаты расчетов и измерений импульсных характеристик заземлителей могут сильно зависеть от расположения токового и потенциального контура вследствие взаимного влияния между проводниками. Подобная оценка влияния проводилась для лучевых заземлителей [1], так как это необходимо для выполнения измерений с заземлителями опор. Однако необходимо также выяснить, в какой степени расположение контуров влияет на расчеты с заземлителем простой формы (при расчетах токовый и потенциальный контуры возможно располагать в том числе и вертикально, в отличие от измерений, а также заменять потенциальный контур интегралом электрического поля).

### Материалы и методы

Для расчетов был использован метод конечных разностей во временной области [2]. Проводники моделировались с помощью метода, предложенного авторами Raiton C. J. и др. [3]. Поглощающие граничные условия – uniaxial perfectly matched layer (UPML) [2]. Также проведены расчеты методом, основанным на телеграфных уравнениях, описанном в работе [4].

### Результаты и обсуждение

Для того чтобы оценить, в какой степени рассчитанное напряжение на заземлителе (соответственно и его сопротивление) может зависеть от расположения токового и потенциального контуров, были проведены расчеты с различным взаимным расположением контуров. Фронт тока в расчетах выбран равным 0,25 мкс, время полуспада – 100 мкс, что в стандарте МЭК по защите от атмосферного электричества рекомендовано для моделирования токов последующих компонентов молнии [5]. Форма импульса задается по формуле [5–7], в зарубежной литературе иногда называемой функцией Хейдлера:

$$i(t) = \frac{I}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $I$  – амплитудное значение тока;  $\eta$  – поправочный коэффициент для амплитуды тока;  $t$  – время;  $\tau$  – константа, определяющая время фронта;  $T$  – константа, определяющая длину импульса. Согласно стандарту МЭК

для моделирования импульса с фронтом 0,25 мкс необходимо принять следующие значения параметров:  $\eta = 0,993$ ,  $\tau = 0,454$ ,  $T = 143$ , а для импульса с фронтом 1 мкс:  $\eta = 0,986$ ,  $\tau = 1,82$ ,  $T = 285$ . Амплитуда тока выбрана равной 1 А с целью удобства пересчета напряжений для любого другого тока вследствие линейности рассматриваемых процессов. Однако данная функция обладает особенностью, согласно которой значение функции вначале увеличивается медленно, поэтому в расчетах она сдвинута по времени влево на 0,5т.

При рассмотрении проводников, расположенных вдоль узлов ортогональной сетки, и подаче импульса тока в конец горизонтального проводника возможны двенадцать вариантов расположения токового и потенциального контуров при горизонтальном расположении токового контура (по три варианта расположения потенциального контура на каждый из четырех вариантов расположения токового) и четыре варианта – при вертикальном расположении токового контура. Некоторые из них симметричны или дают одинаковые результаты согласно теореме взаимности, поэтому разными способами расположения можно считать четыре способа при горизонтальном расположении токового контура и три – при вертикальном (рис. 1).

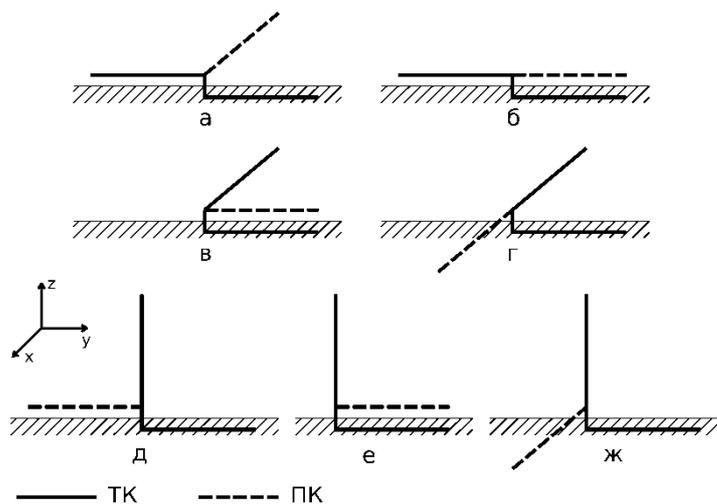


Рис. 1. Различные варианты расположения токового (ТК) и потенциального (ПК) контуров  
Fig. 1. Different locations of the current and potential lead wires

Длина проводника при расчетах составляет 50 м, размер ячейки 0,25 м. Токовый и потенциальный контуры доходят до расчетной границы и таким образом моделируются бесконечными. Глубина расположения горизонтального проводника равна 0,5 м, высота горизонтально расположенных контуров также 0,5 м, удельное сопротивление грунта 500 Ом·м, относительная диэлектрическая проницаемость 12, диаметр проводников 10 мм.

Из рис. 2 видно, что результаты расчетов напряжения при горизонтальном и вертикальном расположениях токового контура различаются значительно (так как токовый импульс одинаковый, то и сопротивления различаются в той же степени).

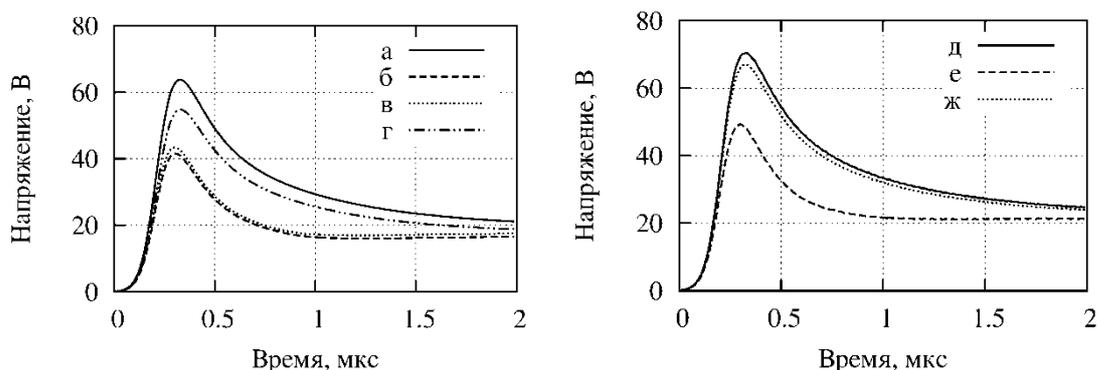


Рис. 2. Результаты расчетов напряжения на заземлителе  
Fig. 2. Calculation results of the grounding potential rise

По проведенным расчетам можно заключить, что расположение потенциального (либо токового согласно теореме взаимности) контура над заземленным проводником резко снижает рассчитанное напряжение (и сопротивление). При этом расположение второго контура слабо влияет на расчет (за исключением различия между горизонтальным и вертикальным расположением токового контура). При перпендикулярном расположении

рассчитанное напряжение больше, чем при расположении контуров на одной линии, что, однако, слабо влияет на результаты расчета, если один из контуров параллелен заземленному проводнику. Иными словами, при углах в 90 и 180 градусов между контурами и заземленным проводником взаимное расположение между контурами играет меньшую роль, нежели расположение одного из контуров по отношению к заземленному проводнику.

Существует также возможность измерять потенциал заземлителя через интеграл электрического поля вдоль линии, доходящей до границы области вычислений. Такой способ расчета потенциала позволит избавиться от влияния проводника потенциального контура на результаты расчета, а также предоставит возможность располагать путь расчета интеграла в грунте. Однако в некоторых случаях результаты расчета потенциала таким способом отличаются от результатов расчетов с помощью потенциального контура. Также в таком случае становится неприменимой теорема взаимности, хотя часто результаты расчетов оказываются близкими при замене местами токового контура и пути расчета интеграла электрического поля.

Далее представлены результаты расчетов, аналогичные предыдущим, но с заменой потенциального контура интегралом электрического поля (рис. 3). Координаты расположения потенциального провода и пути расчета интеграла электрического поля совпадают. Из рисунков видно, что результаты расчетов близки к тем, в которых используется потенциальный контур. Но далее будет показано, что при увеличении удельного сопротивления грунта результаты расчетов могут различаться в большей степени.

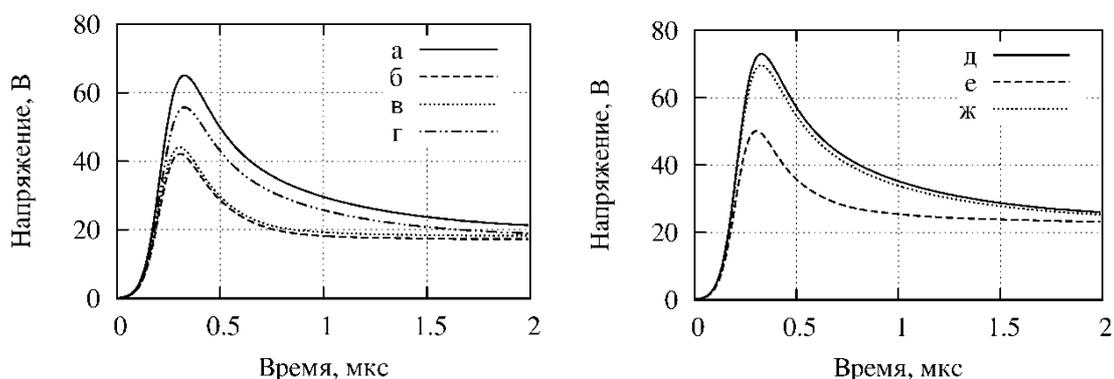


Рис. 3. Результаты расчетов потенциала через интеграл электрического поля  
 Fig. 3. Calculation results of the grounding potential rise using the integral of the electric field

Так как существует возможность располагать путь расчета интеграла электрического поля в грунте, то были проведены соответствующие расчеты. Вертикальное расположение интеграла электрического поля позволяет избавиться от влияния проводников лучевых заземлителей. Возможные варианты расположения токового контура представлены на рис. 4, результаты расчетов – на рис. 5. Из рисунка видно, что результаты в среднем несколько ниже тех, что получены при расположении интеграла электрического поля в воздухе.

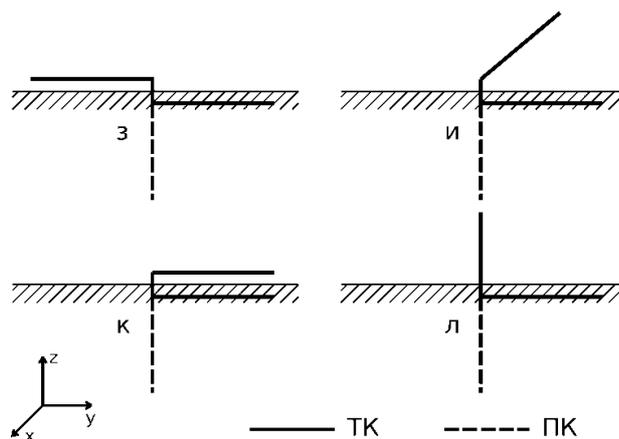


Рис. 4. Различные варианты расположения токового и потенциального контуров  
 Fig. 4. Different locations of the current and potential lead wires

Проведенные расчеты при использовании двух различных способов расчета потенциала показали, что результаты расчетов оказываются относительно близкими. Однако при большом значении удельного сопротивления грунта в случае с параллельным расположением заземлителя и потенциального контура различие становится значительным. На рис. 6 представлено сравнение результатов расчетов для случая "в"

(согласно рис. 1) с использованием потенциального контура и интеграла электрического поля для грунта с удельным сопротивлением 10 000 Ом·м (относительная диэлектрическая проницаемость 6,5).

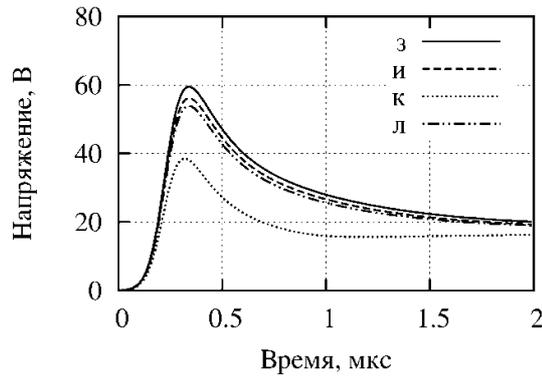


Рис. 5. Результаты расчетов при вертикальном пути интеграла электрического поля  
 Fig. 5. Calculation results for vertical path of the electric field integral

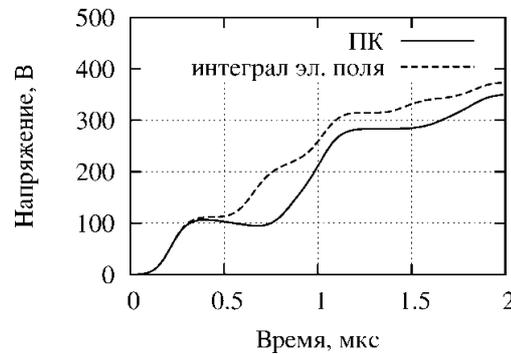


Рис. 6. Сравнение результатов расчетов с использованием потенциального контура и интеграла электрического поля для грунта с высоким удельным сопротивлением  
 Fig. 6. Comparison of calculation results between two methods of GPR measurement: potential lead wire and the electric field integral

Далее было проведено сравнение расчетов методом конечных разностей во временной области с расчетами методом, основанным на решении телеграфных уравнений. Расчеты проводились для того, чтобы определить, какое расположение токового и потенциального контуров будет соответствовать расчетам другими методами. При использовании методов, основанных на телеграфных уравнениях, рассчитывается только скалярный потенциал, а ток может задаваться без токового контура.

Вначале были проведены расчеты сопротивления протяженного проводника по формуле [4]

$$z(t) \approx R \left( 1 - \frac{1 - e^{-2\delta t}}{2\delta t} \right) + \frac{Ll}{3t} \left( 1 - e^{-\delta t} - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} e^{-\frac{t}{T_k}} \right) + \frac{rl}{3} \left[ 1 - \frac{Ll}{15Rt} \left( 1 - e^{-\delta t} - \frac{90}{\pi^4} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^4} e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $T_k = \frac{Ll}{\pi^2 Rk^2}$  – постоянная времени;  $n = \frac{l}{2\pi\omega\epsilon\epsilon_0\rho}$  – число экспоненциальных составляющих ряда Фурье;

$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – скорость распространения волны;  $\delta = \frac{1}{2\epsilon\epsilon_0\rho}$  – коэффициент затухания;  $L = 0,2 \cdot 10^{-6} \left( \ln \frac{2l}{d_0} - 0,31 \right)$  –

погонная индуктивность, Гн/м;  $C = \pi\epsilon\epsilon_0 / \ln \left( \frac{2l}{d_0} - 0,31 \right)$  – погонная индуктивность, Ф/м;  $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{l^2}{d_0} \right)$  –

стационарное сопротивление, здесь  $d_0$  – диаметр проводника.

Длина заземлителя составляет 150 м, диаметр 0,008 мм, глубина расположения 0,8 м, продольное активное сопротивление 0,04 Ом. Расчеты выполнены для пяти значений удельного сопротивления грунта с соответствующими значениями относительной диэлектрической проницаемости:  $\rho_1 = 500$  Ом·м,  $\epsilon_1 = 12$ ;  $\rho_2 = 2\,000$  Ом·м,  $\epsilon_2 = 7,1$ ;  $\rho_3 = 5\,000$  Ом·м,  $\epsilon_3 = 7,0$ ;  $\rho_4 = 12\,500$  Ом·м,  $\epsilon_4 = 6,5$ ;  $\rho_5 = 20\,000$  Ом·м,  $\epsilon_5 = 6,2$ .

Также учтена зависимость погонных значений проводимости, индуктивности и емкости от времени. Результаты расчетов показаны на рис. 7.

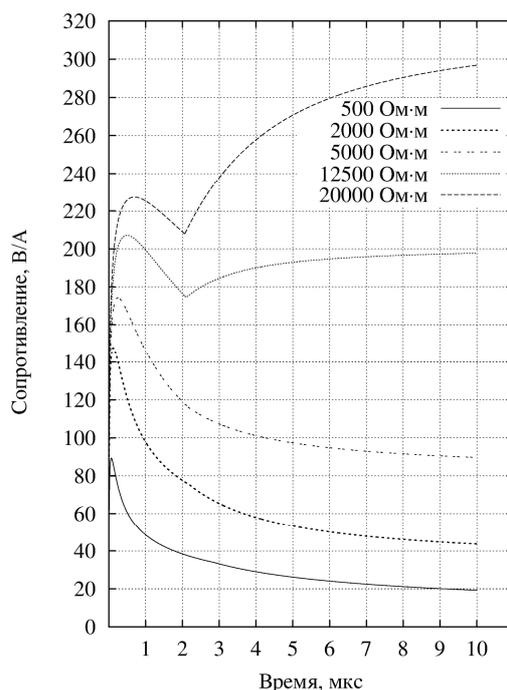


Рис. 7. Результаты расчетов сопротивления протяженного проводника при разных параметрах грунта  
Fig. 7. Calculation results of the transient grounding resistance of horizontal wire for soils with different resistivity

Далее были проведены расчеты для аналогичных параметров грунта и проводника методом конечных разностей во временной области при различных расположениях токового контура и пути расчета интеграла электрического поля. В данном случае задан косугольный импульс тока. Размер расчетной сетки равен 0,2 м. Наиболее близким к результатам по формуле (1) оказался вариант "ж" (согласно рис. 1). Это можно объяснить тем, что при таком расположении взаимное влияние проводников минимально. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

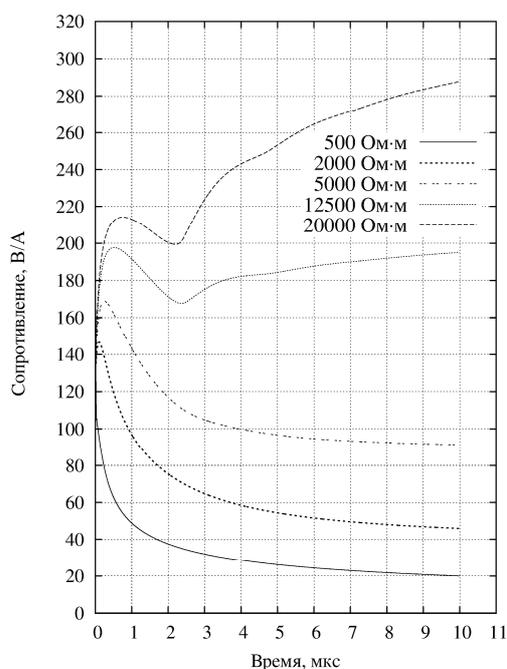


Рис. 8. Результаты расчетов сопротивления протяженного проводника при разных параметрах грунта методом конечных разностей во временной области  
Fig. 8. Transient grounding resistance calculated by the finite difference time domain method

Сравнение результатов расчетов выполнено с помощью среднего арифметического от относительной разности по формуле

$$S = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{Z_{il}(n) - Z_{fdtd}(n)}{Z_{il}(n)} \right| \cdot 100 \%,$$

где  $N$  – количество значений относительной разности сопротивлений для нахождения среднего арифметического;  $Z_{il}$  – сопротивление, найденное по формуле (1);  $Z_{fdtd}$  – сопротивление, рассчитанное методом конечных разностей во временной области. Рассчитанные значения средней относительной разности для различных удельных сопротивлений грунта равны  $S_{500} = 2,5 \%$ ,  $S_{2000} = 2,7 \%$ ,  $S_{5000} = 1,5 \%$ ,  $S_{12500} = 3,6 \%$ ,  $S_{20000} = 5,3 \%$ . Для сравнения: в случае с вариантом "а" различие составило  $S_{500} = 9,3 \%$ ,  $S_{2000} = 3,8 \%$ ,  $S_{5000} = 3,9 \%$ ,  $S_{12500} = 5,4 \%$ ,  $S_{20000} = 6,5 \%$ .

### Заключение

Рассчитанные переходные характеристики в различной степени зависят от следующих параметров: расположения токового и потенциального контуров; замены потенциального контура расчетом интеграла электрического поля; электрических характеристик грунта. Расположение токового или потенциального контуров над заземлителем резко снижает значение рассчитанного напряжения на заземлителе. Сопротивление заземлителя, рассчитанное методом конечных разностей во временной области, соответствует сопротивлению, рассчитанному с использованием метода, основанного на телеграфных уравнениях, в том случае когда проводник заземлителя, токовый и потенциальный проводники перпендикулярны друг другу.

### Библиографический список

1. Куклин Д. В. Оценка влияния взаимного расположения измерительных контуров и проводников заземлителя на результаты измерений импульсных характеристик лучевых заземлителей // Труды КНЦ РАН. 2015. № 8 (34). С. 9–15. (Энергетика ; вып. 11).
2. Taflove A. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston : Artech House, 2005. 1038 p.
3. Railton C. J., Paul D. L., Dumanli S. The treatment of thin wire and coaxial structures in lossless and lossy media in fdtd by the modification of assigned material parameters // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. V. 48, N 4. P. 654–660.
4. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения. М. : Энергия, 1978. 224 с.
5. IEC 62305. Protection against lightning. 2010.
6. 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. V. 12, N 2. P. 141–150.
7. Elrodslly K., Hussein A. M. CN tower lightning return-stroke current simulation // Journal of Lightning Research. 2012. V. 4. P. 60–70.

### References

1. Kuklin D. V. Otsenka vliyaniya vzaimnogo raspolozheniya izmeritelnykh konturov i provodnikov zazemlitelya na rezultaty izmereniy impulsnykh harakteristik luchevykh zazemliteley [Assessing the impact of the mutual arrangement of measuring circuits and earthing conductors measurements of pulse characteristics of radial earth electrodes] // Trudy KNTs RAN. 2015. N 8 (34). P. 9–15. (Energetika ; vyp. 11).
2. Taflove A. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston : Artech House, 2005. 1038 p.
3. Railton C. J., Paul D. L., Dumanli S. The treatment of thin wire and coaxial structures in lossless and lossy media in fdtd by the modification of assigned material parameters // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. V. 48, N 4. P. 654–660.
4. Ryabkova E. Ya. Zazemleniya v ustanovkakh vysokogo napryazheniya [Grounding in high-voltage installations]. M. : Energiya, 1978. 224 p.
5. IEC 62305. Protection against lightning. 2010.
6. 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. V. 12, N 2. P. 141–150.
7. Elrodslly K., Hussein A. M. CN tower lightning return-stroke current simulation // Journal of Lightning Research. 2012. V. 4. P. 60–70.

**Сведения об авторах**

**Куклин Дмитрий Владимирович** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, науч. сотрудник;  
e-mail: kuklindima@gmail.com

**Kuklin D. V.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Research Associate;  
e-mail: kuklindima@gmail.com

**Ефимов Борис Васильевич** – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук, директор;  
e-mail: bvefimov@rambler.ru

**Efimov B. V.** – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Director;  
e-mail: bvefimov@rambler.ru

D. V. Kuklin, B. V. Efimov

### **Influence of location of the lead wires on calculation results of grounding transient characteristics of a grounding rod**

For calculations and measurements of transient characteristics of groundings, the current and potential lead wires are frequently used accordingly to inject the current into the grounding and find the grounding potential rise (GPR). The results of the calculations and measurements can be dependent on the location of the current and potential lead wires due to mutual influence between them and the grounding wire. It is important to determine to what extent the location of the wires influences the calculation results for the grounding with a simple configuration. Notably, in contrast to the measurements, for the calculations it is possible to locate wires vertically, also the potential lead wire can be replaced by the integral of the electric field. For the calculations the finite difference time domain method (FDTD) has been used in the work. In order to estimate to what extent the calculated GPR can be influenced by location of the wires, calculations with different wires locations have been carried out. An analysis of the calculation results has been made. There are calculation methods in which the injection of the current and calculation of the GPR are performed without the current and potential lead wires. The method based on the telegrapher's equations is one of such methods. In order to determine what location of the lead wires gives the same calculation results as those of the method that uses the telegrapher's equations, a comparison of calculation results of two methods has been made. Based on the calculation results it can be concluded that the calculated transient characteristics depend to a different extent on such factors as mutual location of the lead wires and the grounding wire, replacing the potential lead wire by the integral of the electric field, electrical parameters of the soil. Location of one of the lead wires above the grounding wire significantly reduces the calculated GPR. Calculation results for a perpendicular location of three wires (the lead ones and the grounding wire) using the FDTD method correspond to those of the method based on the telegrapher's equation.

**Key words:** FDTD method, transient resistance, grounding potential rise, grounding.