

DOI: 10.18721/JEST.27303

УДК 621.3.053.1

*С.И. Кривошеев, И.С. Колодкин,
С.Г. Магазинов, Ю.К. Очковская, А.Д. Резникова*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ ПРИ ГРОЗОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе приведены результаты испытания заземляющих устройств (ЗУ) линии электропередач при импульсном воздействии. Выполнено моделирование растекание тока вертикальных электродов, разных длин в грунтах с различными электрофизическим параметрами в волновой постановке связанного электромагнитного поля. На основе полученных результатов определены основные действующие факторы, влияющие на формирование волновых процессов вертикального заземлителя – в грунтах с высокими диэлектрической проницаемости и/или удельным сопротивлением волновые процессы наблюдаются более явно; увеличение длины электрода приводит к уменьшению частоты высокочастотной колебательной составляющей тока заземлителя в однородном грунте. Наблюдаемые волновые процессы могут сказаться на переходном импедансе ЗУ и могут повлиять на эффективность защитных мероприятий с использованием, например, нелинейных ограничителей перенапряжений.

Ключевые слова: заземляющее устройство, импеданс, переходная характеристика, грозовое воздействие, молниезащита.

Ссылка при цитировании:

Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Магазинов С.Г., Очковская Ю.К., Резникова А.Д. Моделирование волновых процессов в вертикальном заземлителе при грозовом воздействии // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 27–38. DOI: 10.18721/JEST.27303

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin,
S.G. Magazinov, J.K. Ochkovskaya, A.D. Reznikova*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

WAVE PROCESSES MODELING IN THE VERTICAL GROUNDING ELECTRODE UNDER LIGHTNING IMPACT

The paper presents the results of testing grounding devices (GD) of power lines under impulse impact. The modeling of current spreading in vertical electrodes of various lengths in soils with different electrophysical parameters in the wave formulation of a coupled electromagnetic field is carried out. On the basis of the results obtained, the main factors affecting the formation of wave processes of a vertical ground electrode were determined: in soils with high dielectric permittivity and/or specific resistance, wave processes are observed better; an increase in the length of the electrode leads to a decrease in the frequency of oscillations of the ground electrode current in the homogeneous soil.

The observed wave processes can affect the transient impedance of the GD and the effectiveness of lightning protection using, for example, non-linear surge arresters.

Keywords: grounding device, impedance, transient characteristics, lightning impact, lightning protection.

Citation:

S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin, S.G. Magazinov, J.K. Ochkovskaya, A.D. Reznikova, Wave processes modeling in the vertical grounding electrode under lightning impact, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 27–38, DOI: 10.18721/JEST.27303

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Заземляющее устройство (ЗУ) электроустановок и линий электропередач выполняется для обеспечения работы электрооборудования (ЭО) в номинальном режиме, безопасной работы персонала и защиты ЭО от перенапряжений и сверхтоков. Данные задачи являются важными составляющими систем электроснабжения (СЭС). Неверная разработка ЗУ влечёт за собой нарушения работы СЭС, опасность поражения людей электрическим током и выход из строя ЭО. Поэтому расчётам, испытаниям и разработкам ЗУ посвящено много работ [1–7] и выпущены рекомендательные нормативные документы государственных [8, 9] и международного уровней.

Одной из функций ЗУ является отвод тока молнии в землю для защиты ЭО СЭС [10]. Молниезащита от прямых ударов молнии в ЭО выполняется при помощи установки над распределительными устройствами (РУ) молниеотводов и/или молниезащитной сетки, соединённых с помощью заземляющих проводников с ЗУ подстанции. Молниезащита ЛЭП от прямого попадания молнии выполняется при помощи грозотроса, соединённого заземляющими проводниками с ЗУ ЛЭП напрямую или через искровой промежуток [11]. Молниезащита ЭО от набегающих грозовых волн по ЛЭП выполняется при помощи защитных аппаратов (разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН)), установленных на входе ЛЭП в РУ, которые обеспечивают отвод тока молнии в ЗУ подстанции.

Для эффективного отвода тока молнии в землю необходимо, чтобы импеданс ЗУ находился в заданных контролируемых пределах. Завышенный импеданс ЗУ может привести к протеканию части тока молнии через ЭО или вызвать обратное перекрытие с заземлённых частей ЭО на токопроводящие части, находящиеся под рабочим напряжением, вследствие увеличения потенциала ЗУ.

Импеданс ЗУ при импульсном воздействии может существенно отличаться от стационарного сопротивления, вследствие проявления реактивной составляющей импеданса ЗУ [12–14] и волнового характера распространения электромагнитной волны вдоль заземлителя [15]. Контролировать импеданс ЗУ при грозовом воздействии можно на стадии проектирования и при помощи инструментальных измерений в ходе эксплуатации.

В данной работе приводятся результаты испытаний ЗУ опор при воздействии высоковольтным электрическим импульсом. А также результаты моделирования ЗУ [16] в волновом режиме, на примере вертикальных электродов, длиной 5 м и 20 м в грунтах с различными электрофизическими свойствами.

Целью работы является определение основных действующих факторов, влияющих на формирование волновых процессов ЗУ. Научная ценность заключается в описании численной модели расчёта волновых процессов ЗУ в среде Comsol Mutiphysics и анализе волновых процессов вертикального электрода при стекании тока молнии.

Методы

Испытание ЗУ опор высоковольтным электрическим импульсом

Для испытаний ЗУ опор в работах [17] ранее был разработан генератор импульсов ГИ 1.2/50 (ГСС), схема которого приведена на рис. 1. Работа генератора заключается в разряде конденсатора C_1 , предварительно заряженного до напряжения ~ 10 кВ, через разрядник РУ-62 на нагрузку.

При разряде на активную нагрузку ГИ формирует импульс напряжения по форме соответствующий стандартному грозовому импульсу по ГОСТ, см. рис. 2, при этом форма ток совпадает с формой напряжения.

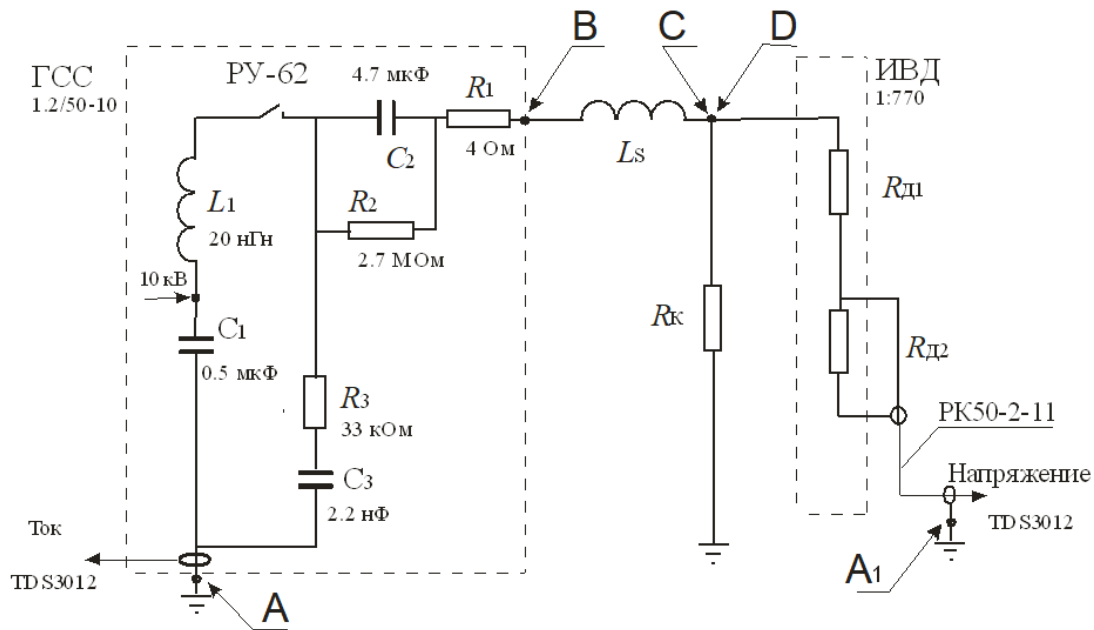


Рис. 1. Схема генератора для испытания ЗУ на импульсное высоковольтное воздействие
 Fig. 1. Scheme of the generator for testing of the grounding device for high voltage impulse impact

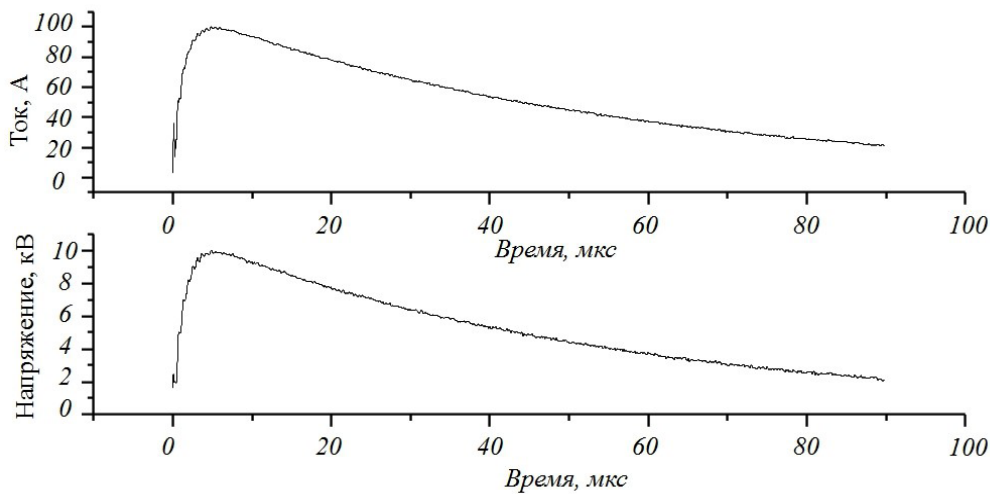


Рис. 2. Формирование стандартного грозового импульса, при разряде ГИ на активную нагрузку $R = 100$ Ом
 Fig. 2. Formation of a standard lightning impulse when the generator is discharged to an active load

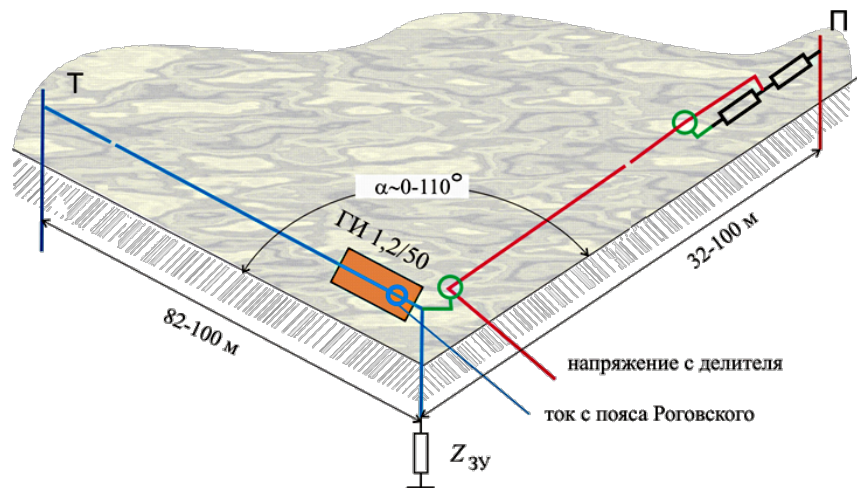


Рис. 3. Схема испытания ЗУ опоры на импульсное воздействие
 Fig. 3. Testing scheme of the grounding device for impulse impact

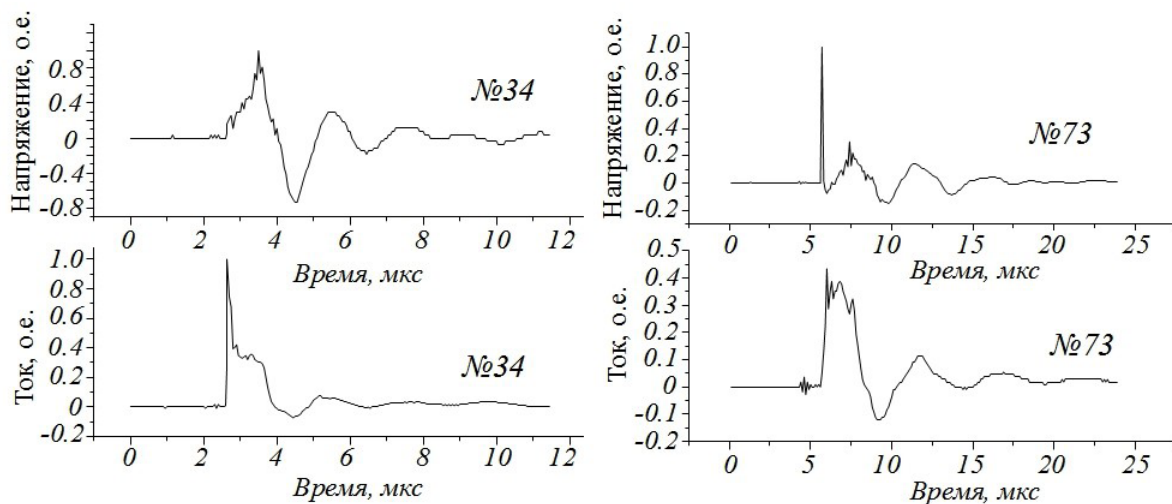


Рис. 4. Результаты испытаний ЗУ опор линии 400 кВ с грозотросом (разные номера соответствуют разным опорам). По данным [18].

Fig. 4. Texting results of the grounding device of the overhead line 400 kV with ground wire

Схема подключения генератора ГИ 1,2/50 к ЗУ опоры приведена на рис. 3. Один вывод ГИ подключается к ЗУ опоры, а другой заземляется при помощи обособленного токового вертикального электрода Т на расстоянии 82 – 100 м от опоры.

Измерение тока проводится при помощи пояса Роговского, установленного на токовый провод, соединяющий ГИ и ЗУ опоры. Для измерения потенциала опоры под углом $\alpha = 0 - 110^\circ$ прокладывается коаксиальный кабель, оплётка которого с одной стороны подключается к ЗУ опоры, а с другой через делитель напряжения к потенциальному отдельностоящему вертикальному заземлителю. Жила данного кабеля с одной стороны подключается к средней точки делителя напряжения, с другой стороны производится измерение напряжения между жилой и оплёткой.

Используя данный генератор проводились испытания ЗУ опор двухцепной ВЛ 400 кВ с грозотросом ПС «Выборгская» – Госграница. Результаты испытаний ЗУ некоторых опор приведены

на рис. 4. По результатам испытаний видно, что кривые тока отличаются от кривых напряжения по форме, что свидетельствует о том что в импедансе ЗУ присутствует реактивная составляющая.

На осциллограммах ЗУ видны колебательные процессы, которые могут вызваны реактивной составляющей ЗУ или переотражением электромагнитных волн в заземлителях. Частоты этих колебаний на разных опорах разные, возможно это объясняется разными длинами заземлителей и разными скоростями электромагнитных волн в грунтах с различными диэлектрическими проницаемостями. Многообразие реакций ЗУ может быть связано не только с разной топологией заземляющих элементов, но и различными электрофизическими характеристиками грунтов, в которых они установлены. Параметры грунтов не только определяющим образом влияют на стационарное сопротивление ЗУ, но и определяют характер пространственно-временного распределения тока в грунте. Реакция ЗУ на импульсное воздействие определяет и эффективность использования нелинейных ограничителей напряжения. Так, в [19, 20] отмечается, что переходное сопротивление ЗУ определяет появление высокочастотной составляющей на фронте импульса при срабатывании ОПН. На примере моделирования процессов растекания тока в стержневом заземлителе ниже показано влияние параметров грунтов и размеров заземлителя на характер тока в нем при воздействии стандартного грозового импульса.

Моделирование волновых процессов вертикального электрода

В данной работе используется программная среда Comsol Multiphysics для моделирования связанного электро-магнитного поля вертикального заземлителя при грозовом воздействии методом конечных элементов. Решения уравнений электрической части поля выполняется в модуле AC/DC – electric currents (ec) относительно электрического потенциала V, магнитной части поля в модуле AC/DC: magnetic fields (mf) относительно векторного магнитного потенциала A:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \bar{J}_{ec} = Q, \\ \bar{J}_{ec} \sigma \bar{E}_{ec} + \frac{\partial \varepsilon \bar{E}_{ec}}{dt} + \bar{J}_{e,ec}, \\ \bar{E}_{ec} = -\nabla V; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \bar{H} = \bar{J}_{mf}, \\ \bar{B} = \nabla \times \bar{A}, \\ \bar{J}_{mf} = \sigma \bar{E}_{mf} + \bar{J}_{e,mf}, \\ \bar{E}_{mf} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t}; \end{array} \right.$$

где J, J_e – полная и внешняя плотность тока; E – напряжённость электрического поля; B – индукция магнитного поля; H – напряжённость магнитного поля; $\sigma, \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ – электропроводность и диэлектрическая проницаемость соответственно ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ec, mf – индексы обозначения переменных которые получаются в результате решения электрической и магнитной части, соответственно.

В магнитной части задачи по умолчанию не учитывается ток смещения, учтём его во внешней плотности тока $J_{e,mf}$, а так же установим связь двух приведённых систем уравнений электрического и магнитного полей осуществляется через внешние плотности тока J_e :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{J}_{e,mf} = \sigma \bar{E}_{ec} + \frac{\partial \varepsilon (\bar{E}_{ec} + \bar{E}_{mf})}{dt} = -\sigma \nabla V - \frac{\partial \varepsilon \nabla V}{dt} - \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2}, \\ \bar{J}_{e,ec} = \sigma \bar{E}_{mf} + \frac{\partial \varepsilon \bar{E}_{mf}}{dt} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2}. \end{array} \right.$$

Данные связующие уравнения учитывают не только токи проводимости, но и токи смещения, включающие вторые производные по времени векторного магнитного потенциала, что

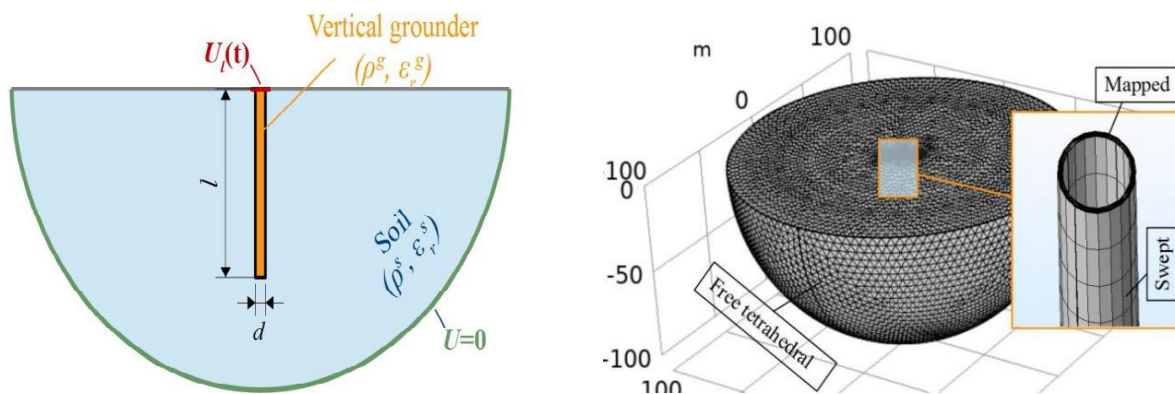


Рис. 5. Геометрия расчётной модели вертикального заземлителя и расчётная сетка

Fig. 5. Geometry of the modeling vertical grounding electrode and computational mesh

позволяет описать волновые электромагнитные процессы. Вообще говоря, в среду Comsol Multiphysics включён отдельный модуль расчёта волновых электромагнитных полей относительно векторного магнитного потенциала с учётом его второй производной по времени, однако в данном модуле имеется ограничение в виде задания внешнего воздействия только с сосредоточенными параметрами.

Геометрия двумерной осесимметричной модели и расчётная сетка приведены на рис. 5.

В качестве внешнего воздействия задаётся потенциал на конце заземлителя, который находится на поверхности земли:

$$U(t) = 200 \cdot 10^3 \left(e^{-t/(0.5 \cdot 10^{-6})} - e^{-t/(67 \cdot 10^{-6})} \right).$$

На удалённой границе грунта задаётся нулевой потенциал. На верхней границе грунта задаётся равенство нулю нормальной компоненты плотности тока. На всех внешних границах расчётной области нормальная составляющая векторного магнитного потенциала равна нулю.

Расчётная сетка вертикального заземлителя выполнена при помощи метода Swept - последовательное вытягивание плоской сетки, предварительно построенной на торце заземлителя, вдоль его длины на определённые промежутки.

Результаты моделирования и анализ

Моделирование проведено для вертикальных заземлителей двух длин 5 м и 20 м в грунтах с удельными сопротивлениями ρ в диапазоне от 500 Ом·м до 2500 Ом·м и относительными диэлектрическими проницаемостями ϵ_r в диапазоне от 1 до 25. По результатам моделирования вычислен ток стекающий в заземлитель, путём интегрирования нормальной компоненты полной плотности токи на верхней границе заземлителя. На рис. 6 представлен ток стекающий с заземлителя, длиной 5 м. По полученным зависимостям видно, что увеличение диэлектрической проницаемости и/или увеличение удельного сопротивления грунта ведёт к лучшему проявлению волновых процессов в заземлителе. Это может быть объяснено тем, что увеличение диэлектрической проницаемости ведёт к увеличению доли тока смещения в полном токе, а увеличение удельного сопротивления ведёт к уменьшению доли тока проводимости в полном токе, стекающем с заземлителя. И то и другое приводит к увеличению влияния вторых производных по времени в уравнениях электромагнитного поля, которые описывают волновые процессы.

В рассматриваемом диапазоне параметров ρ и ϵ_r , максимальные значения составляют $\rho = 2500$ Ом·м и $\epsilon_r = 25$, при которых волновые процессы наиболее выражены, см. рис. 6в, синяя

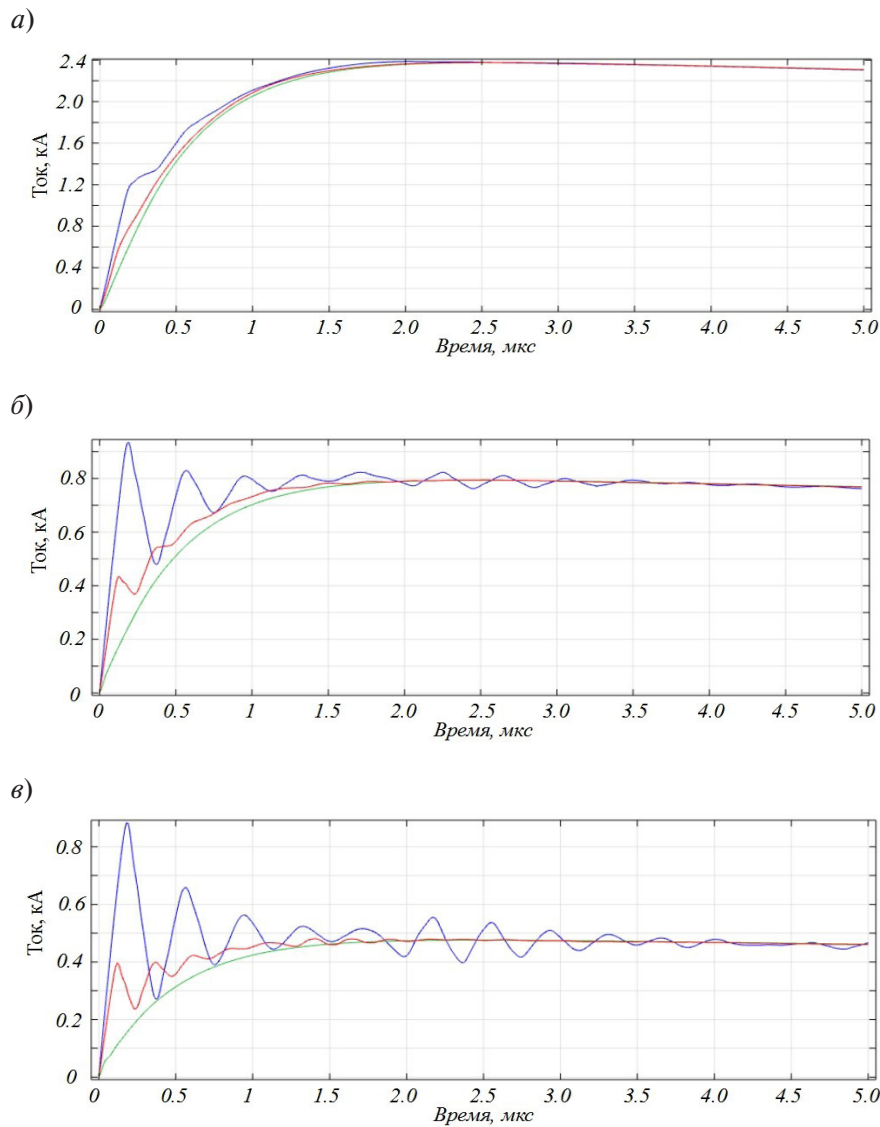


Рис. 6. Результаты моделирования стекания тока с вертикального заземлителя, длиной 5 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях удельного сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ_r грунта: а) $\rho = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, б) $\rho = 1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в) $\rho = 2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; зелёная кривая – $\epsilon_r = 1$, красная – $\epsilon_r = 10$, синяя $\epsilon_r = 25$.

Fig. 6. Results of modeling the current flow from a vertical ground electrode, 5 m long, under the action of the lightning voltage pulse and different values of the resistivity ρ and dielectric constant ϵ_r of the soil: а) $\rho = 500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, б) $\rho = 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, в) $\rho = 2500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$; green curve – $\epsilon_r = 1$, red – $\epsilon_r = 10$, blue $\epsilon_r = 25$

кривая. Расстояние между экстремумами кривой составляет 0,1(6) мкс, что соответствует времени пробега электромагнитной волны по заземлителю, длиной 5 м, туда и обратно со скоростью $v = (\epsilon\mu)^{-1/2} = 60 \text{ м/мкс}$. В момент времени 1,(6) мкс видно наложение электромагнитной волны, отражённой от удалённой расчётной граница грунта, находящейся на расстоянии 50 м от заземлителя.

Для сравнения на рис. 7 представлены результаты стекания тока с заземлителя 20 м. По данным графикам так же видно, что с увеличением диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления грунта волновые процессы наблюдаются более явно. Для случая наиболее выраженного волнового процесса ($\rho = 2500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\epsilon_r = 25$) время между экстремумами тока составляет 0,(6) мкс, что так же соответствует времени пробега электромагнитной волны вдоль заземлителя и обратно.

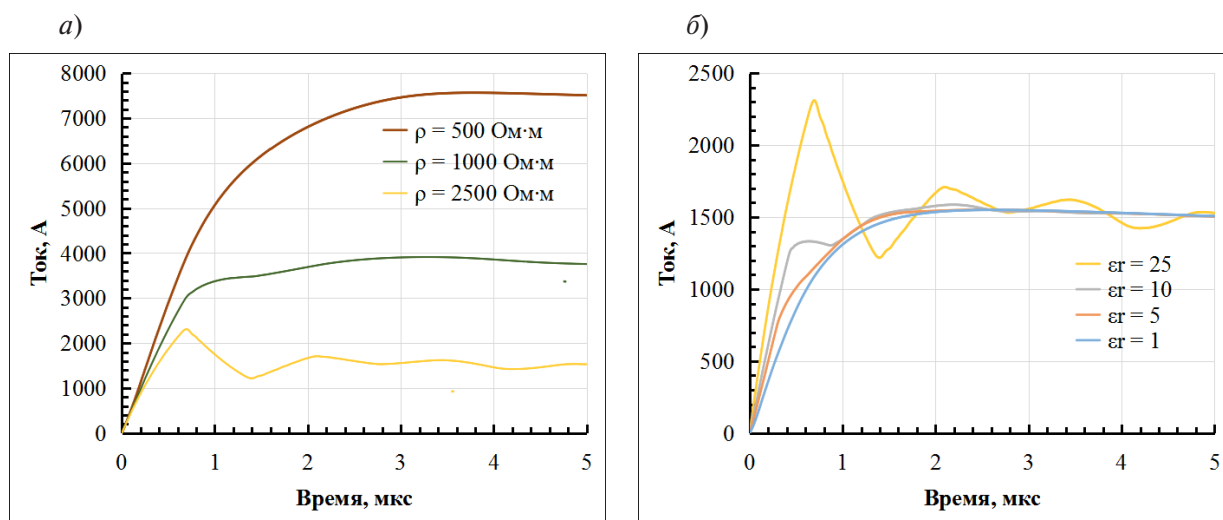


Рис. 7. Результаты моделирования стекания тока с вертикального заземлителя, длиной 20 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях удельного сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ грунта: а) $\epsilon_r = 25$, б) $\rho = 2500$ Ом·м

Fig. 7. Results of modeling the current flow from the vertical ground electrode, 20 m long, under the action of the lightning voltage impulse and different values of the resistivity ρ and dielectric constant ϵ of the soil: а) $\epsilon_r = 25$, б) $\rho = 2500$ Ohm·m

Сравнение графиков рис. 6, 7 свидетельствует о том, что частота колебательной высокочастотной составляющей тока, стекающего с заземлителя, зависит от длины электрода и уменьшается с увеличением длины.

Заключение

Стеkanie тока в ЗУ при грозовом воздействии зависит от электрофизических свойств грунта и геометрии заземлителей. В случае высоких диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления грунта могут наблюдаться волновые процессы, которые проявляются в виде колебательной высокочастотной составляющей тока, стекающего с заземлителя. Частота этих колебаний в однородном грунте увеличивается с уменьшением длины одиночного вертикального заземлителя. Данные высокочастотные колебания определяют характер переходного сопротивления ЗУ и могут повлиять на эффективность защитных мероприятий с использованием, например, нелинейных ограничителей перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. Москва: Энергия, 1978.
- [2] Baba Y., Rakov V.A. On the interpretation of ground reflections observed in small-scale experiments simulating lightning strikes to towers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. № 3(47). С. 533–542. DOI: 10.1109/TEMC.2005.852220
- [3] Lima A.B., Paulino J.O.S., Boaventura W.C., Guimaraes M.F. Transient ground impedance measurement using a very short current lead // 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. 2013. С. 177–183. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729242
- [4] Karaki S., Yamazaki T., Nojima K., Murase H., Takahashi H., Kojima S., Yokota T. Transient Impedance Of Gis Grounding Grid // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. № 2(10). С. 723–731. DOI: 10.1109/61.400859

- [5] **Lima A.B., Paulino J.O.S., Boaventura W.C., Lopes I.J.S., Guimarães M.F., Chisholm W.A., Jamali B., Bologna F.** Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead // *Electric Power Systems Research*. 2015. (118). С. 69–75. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.05.014
- [6] **Korovkin N.V., Krivosheev S.I., Shishigin D.S., Minevich T.G., Boronin V.N.** Mathematical modelling of grounding systems under impact of pulse currents // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. 2018. (2018-January). С. 686–691. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317187
- [7] **Adamyan Y.E., Kolodkin I.S., Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Titkov V.V., Iakushov K.V.** A relation of the parameters of grounding device with the level of over-voltage when a surge arrester triggered // *Proceedings – 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2020*. 2020. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269253
- [8] Правила устройства электроустановок. Издание 7.
- [9] ГОСТ Р 58882-2020 «Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники».
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 62305 – Protection against lightning 2013.
- [11] **Schmitt H., Winter W.** Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems // *International Conference on Power Systems Transients*. 2001. No. 1. P. 6.
- [12] **Reza S., Javad G.** The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines // *Journal of Applied Research and Technology*. 2017. № 6(15). С. 545–554.
- [13] **Harid N.** Experimental Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Line Tower Footings // *Journal of Lightning Research*. 2012. № 1(4). С. 36–44. DOI: 10.2174/1652803401204010036
- [14] **Fujita Y., Morii H., Kubo T.** A method for reducing grounding impedance // *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*. 2013. № 1(185). С. 27–35. DOI: 10.1002/ej.22405
- [15] **Герасимович Д.А., Дерюгина Е.А.** Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: междунар. науч.-техн. жур.* 2012. (1). С. 5–8.
- [16] **Adamyan Y.E., Krivosheev S.I., Kolodkin I.S., Magazinov S.G., Ochovskaya J.K.** Features of Grounding System Modeling under Lightning Impact // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. 2021. С. 1345–1348. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396667
- [17] **Кривошеев С.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Нетреба К.И., Шишигин С.Л.** Идентификация RLC параметров заземляющих устройств опор воздушных линий м тросом импульсным методом // *труды кольского научного центра РАН*. 2010. № 1(1). С. 26–32.
- [18] **Новикова А.Н., Лубков А.Н., Шмараго О.В., Галкова Л.И., Бельцер В.Р., Прохореня О.А., Кривошеев С.И., Ненашев А.П., Арфентьев А.А.** Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств // *Электрические станции*. 2007. (9). С. 53–59.
- [19] **Adamian Y.E., Krivosheev S.I., Korovkin N. V., Monastyrsky A.E., Bocharov Y.N., Kolodkin I.S., Kuli-gin P.I., Titkov V. V.** Dependence of over-voltage level of different voltage class surge arrestors on grounding device parameters. Experimental study and simulation // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2016. (2016-December). С. 1888–1892. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779817
- [20] **Korobeynikov S., Ilushov N., Krivosheev S., Loman V., Magazinov S.** Suppression of Incoming High-Frequency Overvoltage in Transformer Coils // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. С. 1–1. DOI: 10.1109/tpwr.2020.3031592

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРИВОШЕЕВ Сергей Иванович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: ksi.mgd@gmail.com

КОЛОДКИН Иван Сергеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: is.kolodkin@gmail.com

МАГАЗИНОВ Сергей Геннадьевич — ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: magazinov_sg@mail.ru

ОЧКОВСКАЯ Юлия Константиновна — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: o.julya13@yandex.ru

РЕЗНИКОВА Анастасия Дмитриевна — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: reznikova.anastasia97@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 05.07.2021

REFERENCES

- [1] **Ye. Ya. Ryabkova**, Zazemleniya v ustanovkakh vysokogo napryazheniya [Grounding in high voltage installations]. Moskva: Energiya, 1978.
- [2] **Y. Baba, V.A. Rakov**, On the interpretation of ground reflections observed in small-scale experiments simulating lightning strikes to towers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. № 3(47). S. 533–542. DOI: 10.1109/TEMC.2005.852220
- [3] **A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, M.F. Guimaraes**, Transient ground impedance measurement using a very short current lead // 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. 2013. S. 177–183. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729242
- [4] **S. Karaki, T. Yamazaki, K. Nojima, H. Murase, H. Takahashi, S. Kojima, T. Yokota**, Transient Impedance Of Gis Grounding Grid // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. № 2(10). S. 723–731. DOI: 10.1109/61.400859
- [5] **A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes, M.F. Guimarães, W.A. Chisholm, B. Jamali, F. Bologna**, Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead // Electric Power Systems Research. 2015. (118). S. 69–75. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.05.014
- [6] **F. Korovkin, S.I. Krivosheev, D.S. Shishigin, T.G. Minevich, V.N. Boronin**, Mathematical modelling of grounding systems under impact of pulse currents // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018. (2018-January). S. 686–691. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317187
- [7] **Y.E. Adamyan, I.S. Kolodkin, S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, V.V. Titkov, K.V. Iakushov**, A relation of the parameters of grounding device with the level of over-voltage when a surge arrester triggered // Proceedings – 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2020. 2020. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269253
- [8] **Pravila ustroystva elektroustanovok. Izdaniye 7** [Electrical installation rules. Edition 7].

- [9] GOST R 58882-2020 «Zzemlyayushchiye ustroystva. Sistemy uravnivaniya potentsialov. Zazemliteniye. Zzemlyayushchiye provodniki [Grounding devices. Potential equalization systems. Earthing switches. Grounding conductors]».
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 62305 – Protection against lightning 2013.
- [11] **H. Schmitt, W. Winter**, Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems // International Conference on Power Systems Transients. 2001. № 1. S. 6.
- [12] **S. Reza, G. Javad**, The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines // Journal of Applied Research and Technology. 2017. № 6(15). S. 545–554.
- [13] **N. Harid**, Experimental Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Line Tower Footings // Journal of Lightning Research. 2012. № 1(4). S. 36–44. DOI: 10.2174/1652803401204010036
- [14] **Y. Fujita, H. Morii, T. Kubo**, A method for reducing grounding impedance // Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi). 2013. № 1(185). S. 27–35. DOI: 10.1002/eej.22405
- [15] **D.A. Gerasimovich, Ye.A. Deryugina**, Matematicheskoye modelirovaniye impulsnykh kharakteristik vertikalnykh sterzhnevnykh zazemliteley // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. Energetika: mezhdunar. nauch.-tekhn. zhur. 2012. (1). S. 5–8.
- [16] **Y.E. Adamyan, S.I. Krivosheev, I.S. Kolodkin, S.G. Magazinov, J.K. Ochovskaya**, Features of Grounding System Modeling under Lightning Impact // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. S. 1345–1348. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396667
- [17] **S.I. Krivosheev, Yu.N. Bocharov, N.V. Korovkin, K.I. Netroba, S.L. Shishigin**, Identifikatsiya RLC parametrov zzemlyayushchikh ustroystv opor vozduzhnykh liniy m trosom impulsnym metodom // trudy kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2010. № 1(1). S. 26–32.
- [18] **A.N. Novikova, A.N. Lubkov, O.V. Shmarago, L.I. Galkova, V.R. Beltser, O.A. Prokhorenya, S.I. Krivosheev, A.P. Nenashev, A.A. Arfentyev**, Analiz rezultatov izmereniy soprotivleniya zazemleniya opor VL s trosom pri modernizatsii zzemlyayushchikh ustroystv // Elektricheskiye stantsii. 2007. (9). S. 53–59.
- [19] **Y.E. Adamian, S.I. Krivosheev, N.V. Korovkin, A.E. Monastyrsky, Y.N. Bocharov, I.S. Kolodkin, P.I. Kuligin, V.V. Titkov**, Dependence of over-voltage level of different voltage class surge arrestors on grounding device parameters. Experimental study and simulation // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. 2016. (2016-December). S. 1888–1892. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779817
- [20] **S. Korobeynikov, N. Ilushov, S. Krivosheev, V. Loman, S. Magazinov**, Suppression of Incoming High-Frequency Overvoltage in Transformer Coils // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. S. 1–1. DOI: 10.1109/tpwr.2020.3031592

THE AUTHORS

KRIVOSHEEV Sergey I. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ksi.mgd@gmail.com

KOLODKIN Ivan S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: is.kolodkin@gmail.com

MAGAZINOV Sergey G. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: magazinov_sg@mail.ru

OCHKOVSKAYA Julia K. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: o.julya13@yandex.ru

REZNIKOVA Anastasiya D. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: reznikova.anastasia97@gmail.com

Received: 05.07.2021