

Научная статья
УДК 621.311
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КОНТУРЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

**Виталий Валентинович Колобов¹, Максим Борисович Баранник²,
Виктор Владимирович Ивонин³**

^{1,2,3}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹*v.kolobov@ksc.ru*

²*m.barannik@ksc.ru*

³*v.ivonin@ksc.ru*

Аннотация

На действующей подстанции 150 кВ были проведены экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в контуре заземления. Полученные в ходе эксперимента скорости распространения волн находятся в диапазоне $50\text{--}100\cdot 10^6$ м/с. Таким образом, полученная скорость распространения волны по контуру заземления подстанции в несколько раз меньше скорости света, что кардинально может поменять подходы проектирования заземляющих устройств с точки зрения молниезащиты.

Ключевые слова:

заземление, контур заземления подстанции, электромагнитные волны, генератор импульсов с индуктивным накопителем, гальваническая развязка

Благодарности:

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

Для цитирования:

Колобов В. В., Баранник М. Б., Ивонин В. В. Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в контуре заземления подстанции // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 59–65. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007.

Original article

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION ON A SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

Vitalii V. Kolobov¹, Maksim B. Barannik², Viktor V. Ivonin³

^{1,2,3}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

¹*v.kolobov@ksc.ru*

²*m.barannik@ksc.ru*

³*v.ivonin@ksc.ru*

Abstract

Experimental investigations of the propagation of electromagnetic waves in the grounding wire were carried out at the operating 150 kV substation. The wave propagation velocities obtained during the experiment are in the range of $50\text{--}100\cdot 10^6$ m/s. Thus, the obtained wave propagation velocity along the grounding grid of the substation is several times less than the speed of light, which can radically change the design approaches of the grounding in term of lightning protection.

Keywords:

grounding, substation grounding grid, electromagnetic waves, pulse generator with inductive storage, galvanic isolation

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).

For citation:

Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental investigation of electromagnetic wave propagation on a substation grounding system // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 59–65. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007.

Введение

Чтобы соответствовать законодательным и нормативным требованиям, заземляющие устройства (ЗУ) подстанции должны подвергаться испытаниям после монтажа и установки, а затем повторно в ходе технического обслуживания каждые несколько лет [1]. Испытания необходимы для того, чтобы убедиться, что во время короткого замыкания на землю персонал не подвергается никаким опасностям, а телекоммуникационное оборудование не будет повреждено. Величина повышения потенциала земли и связанные с ним опасности напрямую связаны с компоновкой, токами короткого замыкания и сопротивлением всей системы заземления [2].

Для контроля определяют полное сопротивление ЗУ и потенциалы замыкания на землю на защитных ограждениях, высоковольтных установках. Также проводят исследования целостности контура заземления, элементы которого могут со временем подвергаться коррозии [3, 4].

Когда ток молнии стекает с заземлителя в землю, область заземлителя, с которой осуществляется растекание тока, изначально невелика вокруг точки ввода тока молнии и увеличивается со скоростью, которая зависит от распространения электромагнитного поля в земле [5]. В течение этого периода потенциал на элементах заземлителя повышается неравномерно и может достигать больших значений вблизи точки ввода тока [6–9], что, в свою очередь, может привести к перенапряжениям на оборудовании и во вторичных цепях.

Одной из причин данного исследования послужила авария трансформатора на одной из подстанций, вызванная приходом по линии электропередачи грозовой волны, при этом ОПН всех трех фаз, защищающие трансформатор, были исправны.

Описание эксперимента

Эксперимент проводился на ОРУ распределительной подстанции 150 кВ. Схема проведения эксперимента по исследованию скорости распространения волны по контуру заземления подстанции приведена на рис. 1. Генераторная часть установки включает в себя генератор импульсов тока, подключаемый к контуру заземления подстанции в стационарной точке, осциллограф для контроля формы тока и измерения потенциала заземлителя в точке введения тока, а также устройство формирования импульса начала времени (zero-time pulse), фронт которого совпадает с фронтом вводимого тока. Рост потенциала заземлителя в точке введения тока измеряется известным методом падения напряжения относительно удалённой земли [10].

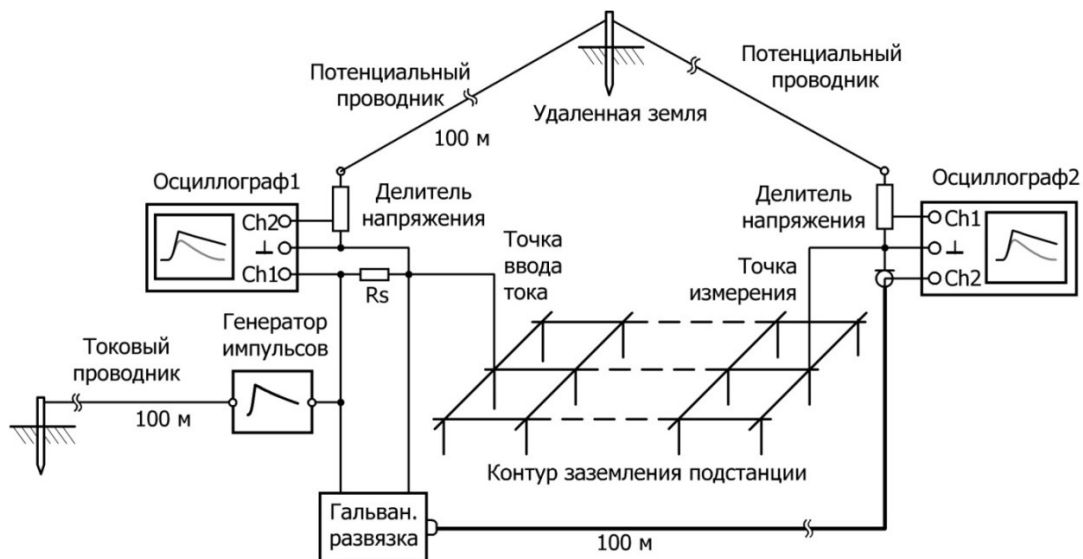


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по исследованию скорости распространения волны по контуру заземления подстанции

Fig. 1. The scheme of the experiment for measuring the surge propagation characteristics of substation grounding grid

В эксперименте использовался генератор импульсов тока на основе индуктивного накопителя энергии. Генератор был разработан для исследования переходного сопротивления [11] локальных ЗУ опор линий электропередачи и молниеотводов. Схема и работа генератора подробно рассмотрены в работах [12, 13].

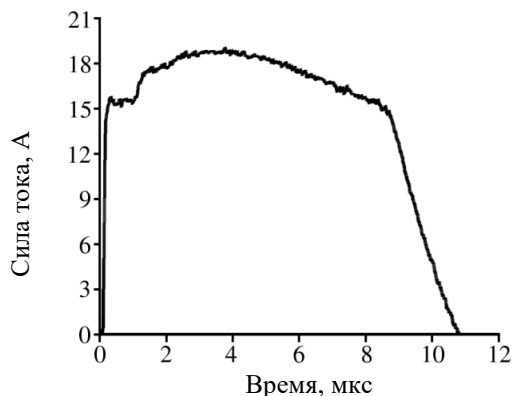


Рис. 2. Осциллограмма генерируемого импульса тока
Fig. 2. The injected current waveform

удаленного потенциала. Как видно из рис. 1, в генераторной и измерительной части установки был использован один общий электрод удаленного потенциала, установленный за пределами ОРУ подстанции на расстоянии 100 м от генератора импульсов тока. Напряжение с делителя напряжения подавалось на первый вход осциллографа, на второй подавалось напряжение импульса начала времени, соответствующее фронту генерируемого импульса тока (рис. 3). Измерение задержки распространения волны по контуру заземления подстанции определялось относительно фронта импульса начала времени, приходящего от генератора тока по коаксиальному кабелю длиной 100 м.

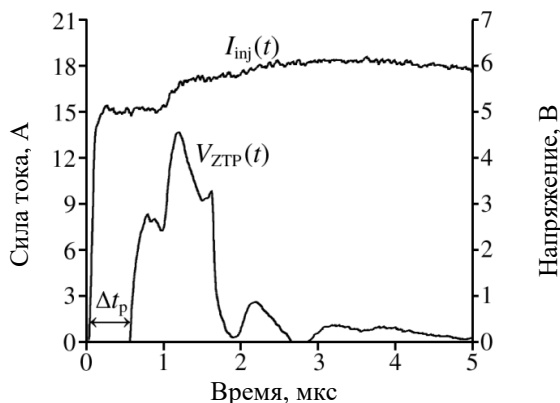


Рис. 3. Осциллограммы генерируемого импульса тока $I_{inj}(t)$ и импульса начала времени $V_{ZTP}(t)$, измеренные на конце коаксиального кабеля длиной 100 м

Fig. 3. Waveforms of injected current $I_{inj}(t)$ and zero-time pulse $V_{ZTP}(t)$ measured at the end of 100 m length coaxial cable

компаратора формируется прямоугольный импульс амплитудой 3,3 В. Амплитуда опорного напряжения 2 В определяется номиналами резисторов R_1 и R_2 , которые образуют делитель напряжения. Импульс с выхода компаратора подается на вход микросхемы цифрового изолятора, выполненной на основе импульсного трансформатора. Максимально допустимое напряжение изолирующего барьера микросхемы составляет 5 кВ, а задержка передачи сигнала не превышает 20 нс.

Генератор с индуктивным накопителем формирует импульс тока (рис. 2) с очень коротким фронтом (не более 100 нс). Такая форма тока содержит широкий спектр частот, совпадающий с частотными компонентами волны перенапряжения на линии электропередачи от вторичных ударов молнии [14] и компонентами волны перенапряжения при перекрытии изоляции [15].

Измерительная часть экспериментальной установки предназначена для определения потенциала ЗУ относительно удаленной земли в выбранных измерительных точках. Измерение потенциала также выполнялось по методу падения напряжения. Измерительная часть включает второй двухканальный осциллограф, делитель напряжения, проводник потенциальный, электрод

Для обеспечения гальванической развязки между коаксиальным кабелем, подключенным к осциллографу измерительной части экспериментальной установки, и цепями протекания выходного тока генератора импульсов было разработано устройство гальванической развязки. Функциональная схема устройства приведена на рис. 4.

Импульс начала времени формируется из падения напряжения на резистивном шунте R_s , который также используется как датчик тока для контроля формы и амплитуды генерируемого тока (см. рис. 1). Напряжение с шунта $V_{Rs}(t)$, повторяющее форму генерируемого тока $I_{inj}(t)$, одновременно подается на один из каналов осциллографа I и на измерительный вход компаратора устройства гальванической развязки. На интервале времени, пока амплитуда напряжения $V_{Rs}(t)$ превышает напряжение 2 В, на опорном входе компаратора, на выходе

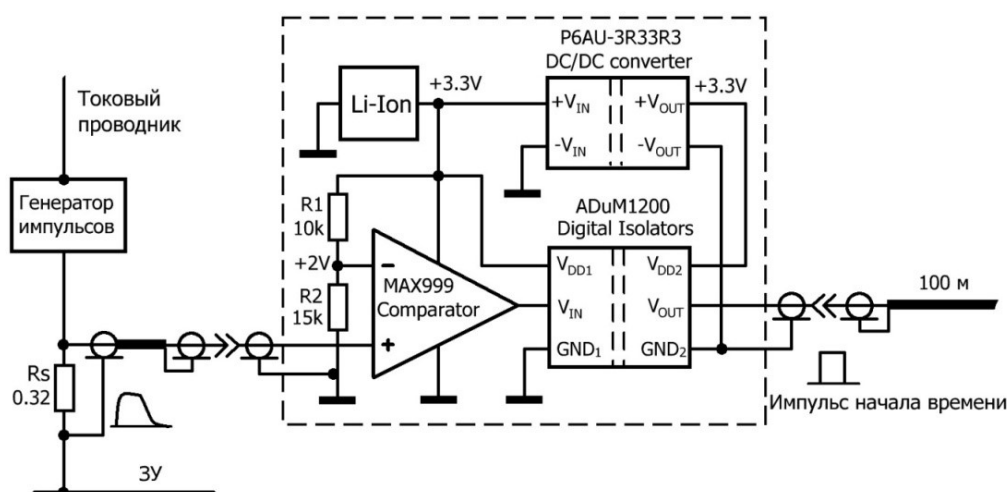


Рис. 4. Функциональная блок-схема устройства гальванической развязки

Fig. 4. Functional block diagram of the galvanic isolation unit

Первичные цепи устройства гальванической развязки питаются от литий-ионного аккумулятора напряжением 3,3 В. Для питания вторичных гальванически изолированных цепей цифрового изолятора используется изолированный DC/DC-преобразователь. Благодаря использованию высокоскоростного компаратора и цифрового изолятора общая задержка распространения сигнала между входом и выходом блока гальванической развязки не превышает 25 нс. Время нарастания импульса начала времени составляет 100–150 нс.

Перед проведением эксперимента была определена задержка распространения импульса начала времени по коаксиальному кабелю Δt_p (см. рис. 3), для чего конец кабеля был подключен ко второму входу осциллографа 1 экспериментальной установки. Как видно из рис. 3, задержка распространения составила 0,55 мкс, что соответствует скорости распространения волны в коаксиальном кабеле, лежащем на земле, — $\sim 180 \cdot 10^6$ м/с. Рис. 3 также показывает, что форма импульса не совпадает с меандром. Этот эффект объясняется тем, что через некоторое время после формирования импульса

начала времени падение напряжения на резистивном шунте R_s превышало напряжение +3,3 В питания первичных цепей устройства и достигало +5 В, чем искажалась форма импульса на выходе микросхемы цифрового изолятора. Однако этот эффект не имел значения, так как форма фронта импульса начала времени, важная при относительных измерениях временной задержки, оставалась неискаженной и позволяла проводить эксперимент и не снижала точности результатов.

На рис. 5 приведено расположение точек измерения на подстанции. Точка 1 является местом подключения генератора импульсных токов к контуру заземления подстанции. Выходы генератора

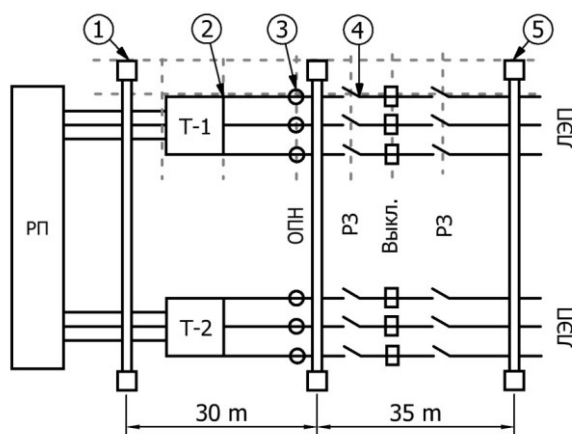


Рис. 5. Схема расположения точек измерения на подстанции

Fig. 5. The location of the measuring points at the substation

импульсных токов и делителя напряжения измерительной системы подключались к шинам заземления на опорах порталов и к проводникам, соединяющим ЗУ подстанции с корпусами электрических

аппаратов как можно ближе к поверхности земли. Для обеспечения надежного электрического контакта с шинами заземления использовались специально разработанные струбцины.

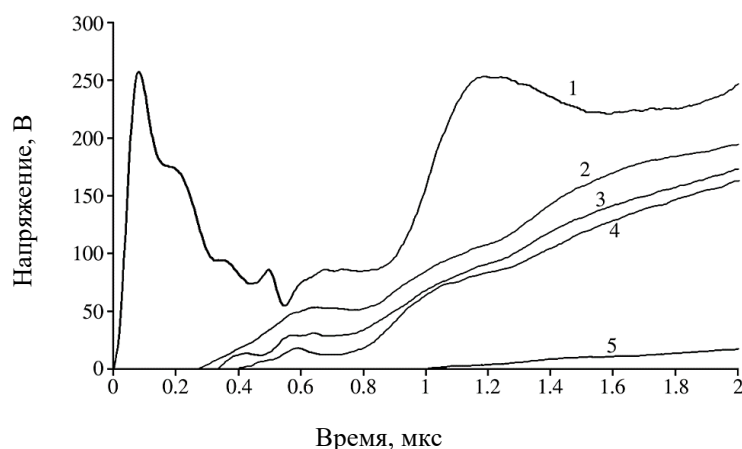


Рис. 6. Осциллограммы напряжения, измеренные в точках 1–5
Fig. 6. Voltage waveforms measured at points 1–5

тока записывалась вторым каналом осциллографа 1 одновременно с записью формы вводимого тока первым каналом осциллографа, осциллограмма не требовала дополнительной обработки. На рис. 6 приведены начальные участки импульсов напряжения для всех точек измерения. Начало оси времени соответствует началу импульса вводимого тока. Скорости распространения волны, измеренные для точек 2–5, лежат в диапазоне $50\text{--}100 \cdot 10^6$ м/с. Таким образом, полученные скорости распространения волн в контуре заземления находящейся в эксплуатации подстанции в несколько раз меньше скорости света.

Наибольший интерес представляет импульс, полученный в самой дальней точке 5, так как точно известно расстояние от места введения тока в контур заземления до этой точки и, кроме того, можно предположить, что существует прямой проводник между точками 1 и 5. Из рис. 6 видно, что скорость прохождения волны от точки 1 до точки 5 составляет 65 м/мкс, или $65 \cdot 10^6$ м/с. Полученные экспериментальные значения хорошо коррелируются с аналогичными опытами, проведенными для заглубленных проводников [16], находящихся в грунтах со схожими параметрами и результатами математического моделирования [17] для контура заземления, имеющего аналогичные размеры, в том числе и размеры ячеек, и находящиеся в грунтах с удельным сопротивлением 1000–2000 Ом·м.

Заключение

При правильном выборе ОПН по классу напряжения и соблюдении расчетного расстояния защищенного подхода без учета скорости распространения волны тока по ЗУ на защищаемом оборудовании, в частности на трансформаторе, могут возникать перенапряжения, превышающие остающееся напряжение.

Полученные в ходе эксперимента результаты совпадают с расчетными результатами скорости волны для грунтов аналогичного удельного сопротивления. На наш взгляд, надо уменьшать локальное импульсное сопротивление в месте подключения ОПН к заземляющему контуру подстанции, для чего надо делать меньше ячейки, то есть увеличивать число вертикальных электродов именно в месте заземления ОПН.

При проведении расчетов установки ОПН, защищающих подстанцию от волн перенапряжений, набегающих с ЛЭП, надо учитывать скорость распространения волны тока по контуру заземления подстанции.

Список источников

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок: [СТО 56947007-29.130.15.105-2011]: стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (дата обращения: 21.04.2023).
2. Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental Investigation of Surge Propagation Characteristics on a Substation Grounding System // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2096. P. 012113.
3. Об утверждении правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 12.08.2022 № 811 // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (дата обращения: 21.04.2023).
4. Ma Y., Karady G. Investigating grounding grid integrity based on the current injection method 41st North American Power Symposium. 2009. P. 1–5. doi:10.1109/NAPS.2009.5484048.
5. Grcev L, Markovski B. Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, No. 2. P. 1183–1192. doi:10.1109/TPWRD.2020.3003427.
6. Grcev L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, No. 3. P. 1692–1699. doi:10.1109/TPWRD.2010.2102779.
7. Gupta B., Thapar B. Impulse Impedance of Grounding Grids // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1980. Vol. PAS-99, No. 6. P. 2357–2362. doi:10.1109/TPAS.1980.319800.
8. Grcev L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 815–823. doi:10.1109/61.489339.
9. Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization / R. Zeng [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, No. 2. P. 667–675. doi:10.1109/TPWRD.2007.915194.
10. Visacro S. The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60, No. 5. P. 1602–1605. doi:10.1109/TEMPC.2017.2788565.
11. Tong X., Dong X., Tan B. High current field test of impulse transient characteristics of substation grounding grid // The Journal of Engineering 2018–2021. 2019. doi:10.1049/joe.2018.8826.
12. A current source with an inductive energy storage for measuring pulse impedances of grounding connections / V. V. Kolobov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57 (5). P. 572–578. doi:10.1134/s0020441214040162.
13. Kolobov V., Barannik M. Portable system for measuring the grounding resistance of power transmission poles using rapidly increasing current pulses // International Multi-conference 2020 on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. P. 1–6.
14. Anderson R. B., Eriksson A. J. Lightning parameters for Engineering applications Electra. 1980. P. 65–102.
15. Экспериментальные исследования пробоя гирлянды изоляторов воздушных линий электропередачи / В. В. Ивонин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып. 18. 2019. № 5 (10). С. 130–136.
16. Basic investigation of wave propagation characteristics on an underground naked conductor / A. Ametani [et al.] // Proc. Int. Conf. Elect. Eng. 2002. P. 2141–2146.
17. Sekioka S., Lorentzou M., Hatziargyriou N. A simplified formula of surge characteristics of a long grounding conductor // Proc. of Intern. Conf. on Power Systems Transients. New Orleans, 2003.

References

1. *Metodicheskie ukazaniya po kontrolju sostojanija zazemljajushhih ustrojstv elektroustanovok, STO 56947007-29.130.15.105-2011* [Methodological guidelines for monitoring the condition of grounding devices of electrical installations]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (accessed 21.04.2023).
2. Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental Investigation of Surge Propagation Characteristics on a Substation Grounding System. J. Phys.: Conf. Ser., 2021, Vol. 2096, pp. 012113.
3. *Prikaz Ministerstvaja energetiki Rossijskoj Federacii ot 12 avgusta 2022 g. № 811 «Ob utverzhdenii pravil tehničeskoj ekspluatacij elektroustanovok potrebitelej elektricheskoj energii»* [About

- the approval of the rules of technical operation of electrical installations of consumers of electric energy]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (accessed 21.04.2023).
4. Ma Y., Karady G. Investigating grounding grid integrity based on the current injection method 41st North American Power Symposium, 2009, pp. 1–5. doi:10.1109/NAPS.2009.5484048.
 5. Grcev L., Markovski B. Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, Vol. 36, No. 2, pp. 1183–1192. doi:10.1109/TPWRD.2020.3003427.
 6. Grcev L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26, No. 3, pp. 1692–1699. doi:10.1109/TPWRD.2010.2102779.
 7. Gupta B., Thapar B. Impulse Impedance of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2357–2362. doi:10.1109/TPAS.1980.319800.
 8. Grcev L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 815–823. doi:10.1109/61.489339.
 9. Zeng R., Gong X., He J., Zhang B., Gao Y. Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 667–675. doi:10.1109/TPWRD.2007.915194.
 10. Visacro S. The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, Vol. 60, No. 5, pp. 1602–1605. doi:10.1109/TEM.2017.2788565.
 11. Tong X., Dong X., Tan B. High current field test of impulse transient characteristics of substation grounding grid. The Journal of Engineering 2018–2021, 2019. doi:10.1049/joe.2018.8826.
 12. Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N., Kuklin D. V. A current source with an inductive energy storage for measuring pulse impedances of grounding connections. Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57 (5), pp. 572–578. doi:10.1134/s0020441214040162.
 13. Kolobov V., Barannik M. Portable system for measuring the grounding resistance of power transmission poles using rapidly increasing current pulses. International Multi-conference 2020 on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–6.
 14. Anderson R. B., Eriksson A. J. Lightning parameters for Engineering applications Electra, 1980, pp. 65–102.
 15. Ivonin V. V., Danilin A. N., Efimov B. V., Karpov A. S., Klimov A. A. Jeksperimental'nye issledovanija probuja girljandy izoljatorov vozdušnyh liniij elektroperedachi [Experimental investigations of high voltage power transmission line insulators breakdown]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre], 2019, No. 5, pp. 130–136. (In Russ.).
 16. Ametani A., Nayel M., Sekioka S., Sonoda T. Basic investigation of wave propagation characteristics on an underground naked conductor Proc. Int. Conf. Elect. Eng., 2002, pp. 2141–2146.
 17. Sekioka S., Lorentzou M., Hatziaargyriou N. A simplified formula of surge characteristics of a long grounding conductor. Proc. of Intern. Conf. on Power Systems Transients, New Orleans, 2003.

Информация об авторах

В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

М. Б. Баранник — научный сотрудник;

В. В. Ивонин — научный сотрудник.

Information about the authors

V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Researcher;

M. B. Barannik — Researcher;

V. V. Ivonin — Researcher.

Статья поступила в редакцию 05.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 05.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.