

Расчет кривых опасных параметров при высоких сопротивлениях заземлений опор линий электропередачи

КУКЛИН Д.В., ЕФИМОВ Б.В.

При расчете кривых опасных параметров используется предположение, согласно которому напряжение на изоляции резко падает после окончания фронта тока молнии. Однако при высоких значениях сопротивлений заземлителей данное предположение не верно, поэтому в таких случаях обратные перекрытия изоляции могут происходить и на спаде тока. Это приводит к ошибке расчета кривых опасных параметров и, как следствие, ошибочному значению вероятности перекрытия изоляции. Представлены примеры расчетов кривых опасных параметров, позволяющие оценить уровень ошибки, а также рассчитаны значения вероятностей как при учете перекрытий изоляции на спаде тока, так и без него. Показано, что отсутствие учета перекрытий на спаде тока молнии может приводить к существенной ошибке расчета вероятности перекрытия изоляции.

Ключевые слова: опора линии электропередачи, заземление, кривая опасных параметров, расчет, метод конечных разностей

Для расчета напряжений на изоляции опор часто используется линейно возрастающий ток [1, 2]. При этом делается допущение, согласно которому после окончания фронта тока напряжение резко падает, поэтому перекрытие изоляции в последующие моменты времени принимается маловероятным [3]. Это действительно так в случае с заземлителями, имеющими относительно низкое сопротивление. Однако при высокоомных заземлениях напряжение растет некоторое время даже после прекращения роста тока либо падает незначительно. Это происходит потому, что при больших значениях сопротивлений падение напряжения на заземлителе сравнимо с падением напряжения на индуктивности опоры. Пренебрежение перекрытиями изоляции после окончания роста тока приводит к недооценке опасности токов молнии с относительно низкими амплитудами при большой крутизне.

Расчет кривых опасных параметров. Существует подход расчета вероятности перекрытия изоляции, основанный на так называемых кривых опасных параметров [1, 4]. В этом подходе определяется область токов и крутизны, сочетание которых приводит к перекрытию изоляции. Границы этой области задаются кривой опасных параметров. Вероятность перекрытия изоляции равна интегралу функции двумерной плотности вероятности сочетания амплитуд и крутизны по данной области. Таким образом, для данного подхода значение вероятности перекрытия изоляции определяется расположением кривой опасных параметров относительно функции двумерной плотности вероятности амплитуд и крутизны тока молнии (помимо вида самой этой функции).

При отсутствии учета перекрытий изоляции на спаде тока (и напряжения) в случае с высокоомными заземлителями результат расчета кривой опасных параметров оказывается неверным, что приводит к ошибке расчета вероятности перекрытия изоляции. Оценка значения данной ошибки может быть продемонстрирована на конкретном примере.

Проведем вначале расчеты для случая с низкоомным сопротивлением заземления опоры. Рассчитаем напряжение на изоляции верхней фазы опоры П330-2 (рис. 1) при подаче тока в вершину опоры. Удельное сопротивление грунта равно 300 Омж,

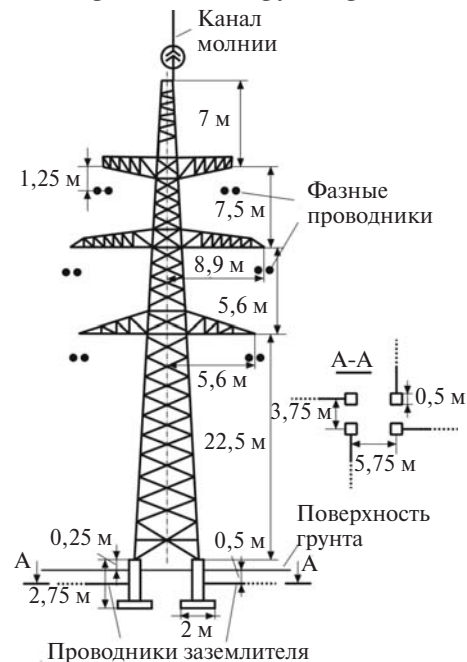


Рис. 1. Схема моделируемой опоры (некоторые размеры модели незначительно отличаются от действительных размеров опоры П330-2 из-за ограничений, накладываемых формой расчетной сетки)

относительная диэлектрическая проницаемость выбрана равной 16. Заземлитель опоры состоит из четырех лучей диаметром 12 мм и длиной по 50 м. Фундаменты моделировались как целиком металлические [5]. Фазные проводники состоят из двух проводов диаметром по 24 мм, грозотрос имеет диаметр 10 мм, диаметр канала молнии принят равным 10 мм.

Для расчетов был использован метод конечных разностей во временной области [6]. Размер расчетной сетки равен 0,25 м. Проводники опоры моделировались с помощью ступенчатой аппроксимации [7] (диаметр проводников в таком случае составляет 0,1 м). Проводники заземлителей, фазные проводники и проводник канала молнии моделировались с помощью метода [8]. Поглощающие граничные условия — convolutional perfectly matched layer (CPML) [6].

Результат расчета напряжения на изоляции верхней фазы для линейно нарастающего тока представлен на рис. 2. Напряжение в этом случае близко к напряжению для относительно схожей по параметрам опоры 330 кВ в [1] (стационарное сопротивление в данном случае также составляет единицы ом).

Кривая опасных параметров согласно подходу в [1] рассчитывается следующим образом. В соответствии с вольт-секундной характеристикой (ВСХ) для изоляции линии 330 кВ на рис. 3, представленной в [1], прочность изоляции в момент времени 4 мкс составляет около 1950 кВ. Опасное значение крутизны тока для такого напряжения находится через отношение U/a по рис. 2 как $a = 1950 / 70 \approx 28$ кА/мкс (в момент времени 4 мкс $U/a \approx 70$ Ом·мкс). Опасное значение амплитуды тока равно $I = at = 28 \cdot 4 = 112$ кА.

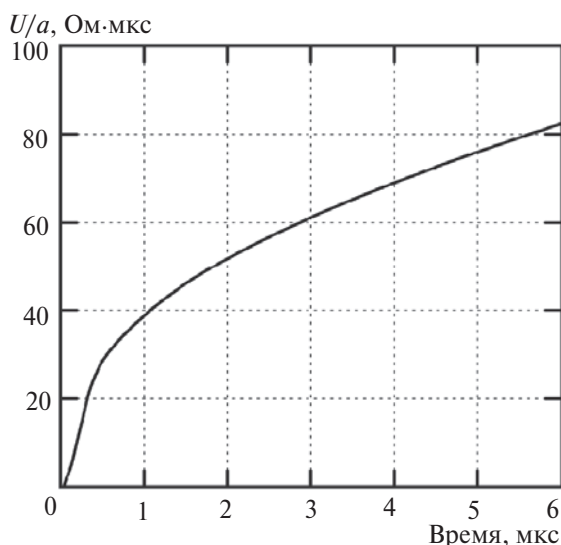


Рис. 2. Напряжение на изоляции верхней фазы при линейно возрастающем токе молнии, отнесенное к крутизне тока (или напряжение при крутизне тока в 1 А/мкс)

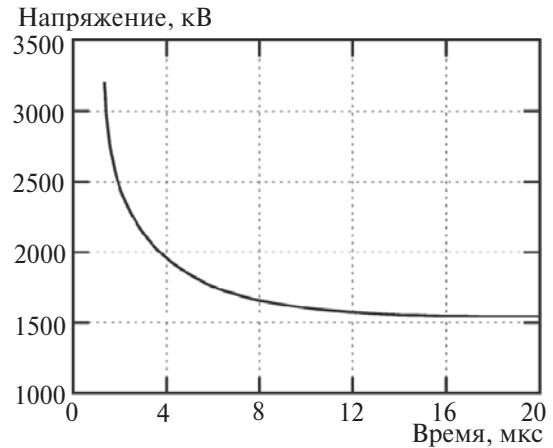


Рис. 3. Вольт-секундная характеристика изоляции линии 330 кВ

Результаты расчетов представлены на рис. 4 (кривая 1). При расчете кривой опасных параметров использовалось напряжение на изоляции верхней фазы до момента времени 20 мкс.

Более корректный расчет кривой опасных параметров может осуществляться путем повышения амплитуды при определенной крутизне тока до момента перекрытия (определяемого по напряжению ВСХ), т.е. для каждого сочетания крутизны и амплитуды рассчитывается соответствующее данному сочетанию напряжение на изоляции. Рассчитанная таким образом кривая опасных параметров показана на рис. 4 (кривая 2). В расчетах использован импульс тока треугольной формы [9] с временем полупада 77,5 мкс [10]. Из рис. 4 видно, что кривая 2 практически не отличается от кривой 1 для линейно возрастающего тока, т.е. при низкоомном сопротивлении заземления перекрытия происходят в момент времени, близкий к моменту окончания фронта тока.

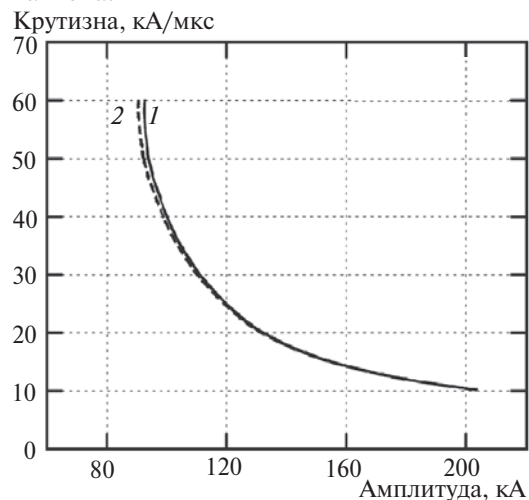


Рис. 4. Кривые опасных параметров для случая с грунтом, имеющим удельное сопротивление 300 Ом·м: 1 — линейно нарастающий ток; 2 — ток треугольной формы

Вероятность перекрытия изоляции

$$P = \iint_D p(I, a) dI da, \quad (10)$$

где $p(I, a)$ — двумерная плотность вероятности сочетания амплитуд и крутизны; D — область справа от кривой опасных параметров.

Так как кривая опасных параметров построена только для конечных значений крутизны и амплитуды, в расчетах она продлевается прямыми, параллельными осям [4].

Далее проведем расчет напряжения на изоляции верхней фазы для той же опоры при удельном сопротивлении грунта $5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; так как удельное сопротивление грунта большое, фундаменты в расчетах не учитывались (рис. 5).

Кривая опасных параметров для данного случая, рассчитанная при использовании линейно нарастающего тока, представлена на рис. 6.

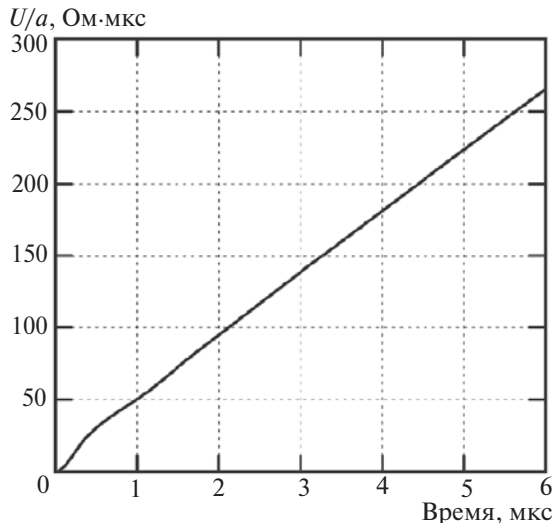


Рис. 5. Напряжение на изоляции верхней фазы при линейно возрастающем токе молнии в случае с высокоомным сопротивлением заземления опоры

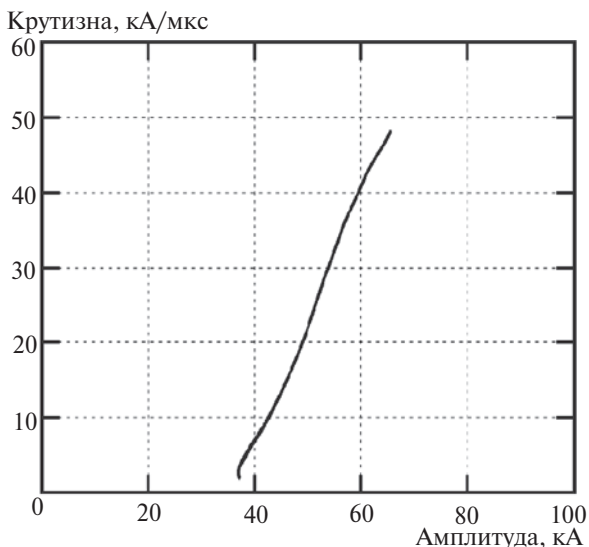


Рис. 6. Кривая опасных параметров для случая с грунтом, имеющим удельное сопротивление $5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Из рис. 6 видно, что при увеличении крутизны тока опасное значение амплитуды существенно увеличивается. Сопоставим ВСХ изоляции и напряжения на изоляции верхней фазы для токов с определенной амплитудой и крутизной (иными словами, для импульсов тока, имеющих как фронт, так и спад). На рис. 7 представлены напряжения на изоляции верхней фазы для токов, имеющих одинаковые амплитуды, но разную крутизну. Как и ранее, использован ток треугольной формы с прежним временем полуспада. Из анализа напряжений и ВСХ (рис. 3) видно, что увеличение крутизны тока не может приводить к столь значительному увеличению опасной амплитуды (как на рис. 6), так как напряжения на момент времени возможного перекрытия изоляции для разной крутизны различаются лишь в небольшой степени. Однако незначительное увеличение опасной амплитуды с крутизной в расчетах все же не исключено из-за существования отражений волн в опоре и заземлителе, а также по той причине, что при одинаковом заданном времени полуспада напряжение для токов с более крутым фронтом к моменту времени в несколько микросекунд (когда происходит перекрытие изоляции) успевает упасть больше, чем для токов с менее крутым фронтом (рис. 7).

Кривая опасных параметров, полученная при использовании тока треугольной формы, представлена на рис. 8. Опасные значения амплитуды изменятся в интервале $37\text{--}42 \text{ кА}$, т.е. зависят от крутизны тока в меньшей степени, чем ранее, и лучше соотносятся с прочностью изоляции при более близких к реальным напряжениям на ней. Таким образом, перекрытия изоляции в данном случае могут происходить в широком диапазоне времени, а не только на фронте тока.

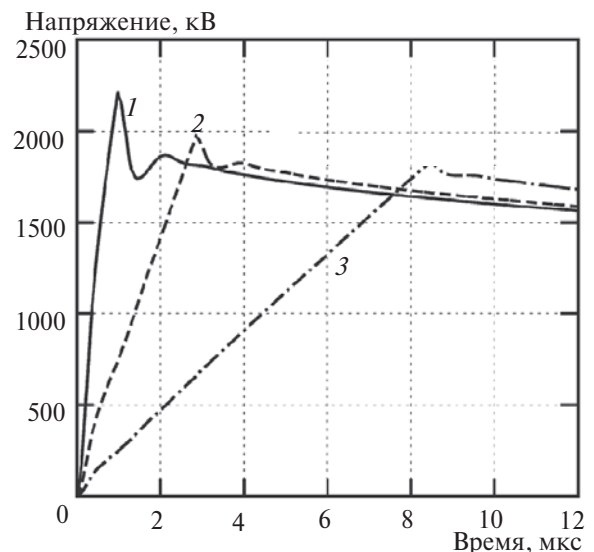


Рис. 7. Напряжения на изоляции верхней фазы для разных значений крутизны тока при амплитуде тока 42 кА : 1 — 45 кА/мкс ; 2 — 15 кА/мкс ; 3 — 5 кА/мкс

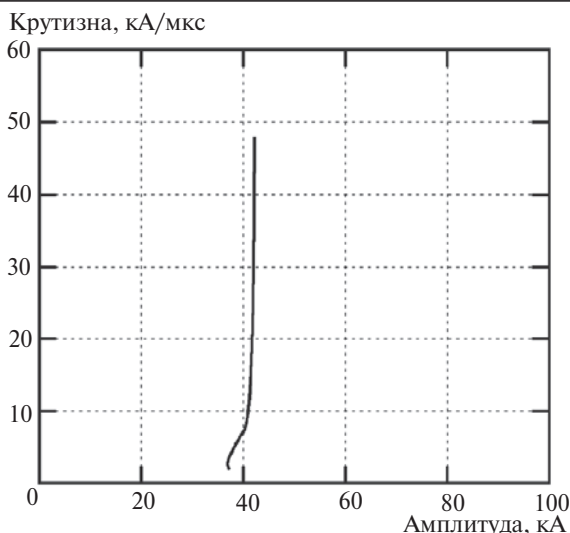


Рис. 8. Кривая опасных параметров, рассчитанная на основе тока треугольной формы

Как видно из рис. 8, все же есть некоторое уменьшение амплитуды с уменьшением крутизны, что, вероятно, связано с отмеченным ранее спадом тока, а также с тем, что в расчетах используются ВСХ для стандартной волны [4]. Методы, определяющие прочность изоляции при так называемых нестандартных напряжениях [11–13], могут привести к более точному результату.

Вероятность перекрытия при использовании принятых в настоящее время вероятностных данных о токах молнии [10] для первых компонентов (медиана амплитуды 27,7 кА, крутизны — 24,3 кА/мкс, среднеквадратическое отклонение амплитуды 0,461, крутизны — 0,599), рассчитанная методом [4] согласно кривой опасных параметров на рис. 6, равна 0,10, а для кривой опасных параметров на рис. 8 — 0,19, т.е. недооценка вероятности при отсутствии учета перекрытий изоляции на спаде тока может быть значительной.

Принимая во внимание то, что для высокоомных заземлителей опасное значение амплитуды тока зависит от крутизны незначительно, для расчета, по крайней мере, оценочного значения вероятности перекрытия изоляции можно использовать лишь критическое значение тока. Так, приняв для рассмотренного случая критическое значение амплитуды тока равным 42 кА и используя представленные ранее данные о распределении токов молнии, получаем значение вероятности перекрытия изоляции, равное 0,18.

Выводы. 1. Метод [1] рассчитан на случай перекрытия изоляции в момент прекращения роста тока молнии и не учитывает перекрытия в более поздние моменты времени, что согласно расчетам вполне возможно в случае с высокоомными заземлениями опор. Это приводит к ошибке расчета кривых опасных параметров и, как следствие, ве-

роятности перекрытия изоляции, значение которой используется в дальнейшем для расчета числа годовых отключений при проектировании линии электропередачи.

2. Значение ошибки расчета вероятности перекрытия изоляции может меняться от случая к случаю, так как рассчитанные значения вероятности существенно зависят от расположения кривой опасных параметров по отношению к функции двумерной плотности вероятности амплитуд и крутизны тока молнии. Например, ошибка невелика, если кривые опасных параметров, рассчитанные разными способами, расположены на участке, где функция плотности вероятности изменяется незначительно с изменением амплитуды тока. Во избежание данной ошибки, по крайней мере, в случае высокоомных заземлений расчеты кривых опасных параметров следует осуществлять на основе полных токов молний (включающих как фронт, так и спад) вместо косоугольного тока. Более того, для реальных токов молнии среднее и максимальное значения крутизны на фронте различаются, и для более точных расчетов необходимо использовать специальные математические функции, корректно отражающие особенности токов молнии [14,15].

3. Для более точного определения перекрытия изоляции при нестандартных формах напряжений можно использовать соответствующие методы [11–13], но важно учитывать, для каких форм импульсов и каких изоляционных промежутков конкретный метод был разработан, а также то, что прочность изоляции зависит в том числе от типа линейных изоляторов (при одинаковой строительной высоте) [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. — М.: ГЭИ, 1959, 216 с.
2. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. — М.: Энергия, 1968, 464 с.
3. Борисоглебский П.В., Дмоховская Л.Ф., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С., Разевиг Д.В., Рябова Е.Я. Техника высоких напряжений. — М.: ГЭИ, 1963, 473 с.
4. Корсунцев А.В., Покровская К.И. Кривые опасных параметров и расчет вероятности перекрытия изоляции воздушных линий при ударах молнии. — Известия НИИПТ, 1963, № 10, с. 3–17.
5. Корсунцев А.В., Покровская К.И. Методика расчета сопротивлений заземления железобетонных фундаментов. — Электрические станции, 1968, № 11, с. 63–68.
6. Taflov A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Third Edition. Boston: Artech House, 2005, 1006 p.
7. Noda T., Yonezawa R., Yokoyama S., Takahashi Y. Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in FDTD surge simulation. — IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, vol. 19, No. 4, pp. 1913–1918.
8. 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

Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2006, vol. 48, No. 4, pp. 654–660.

9. LaForest J.J. Transmission line reference book, 345 kV and above. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1982, 625 p.

10. Rakov V.A., Borghetti A., Bouquegneau C., Chisholm W.A., Cooray V., Cummins K., Diendorfer G., Heidler F., Hussein A.M., Ishii M., Nucci C.A., Piantini A., Pinto O., Qie X., Rachidi F., Saba M., Shindo T., Schulz W., Thottappillil R., Visacro S. Lightning parameters for engineering applications. — CIGRE Technical Brochure 549, 2013, 117 p.

11. Pigini A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. — IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, vol. 4, No. 2, pp. 1379–1392.

12. Caldwell R.O., Darveniza M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. — IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1973, vol. PAS-92, No. 4, pp. 1420–1428.

13. Chisholm W.A. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. — IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, vol. 26, No. 2, pp. 14–25.

14. Heidler F., Cvetc 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.

15. Eriksson A., Deller L., Baldo G., Bouquegneau C.H., Darveniza M., Elovaara J., Garbagnati E., Gary C., Grant I., Hileman A., Houlgate R., Huse J., Janischewskij W., Kawamura T.,

Popolansky F., Ruhling F., Weck K.-H. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. — Paris: CIGRE, 1991, 61 p.

16. Новикова А.Н., Шмараго О.В. Разработка методических и практических вопросов гроззащиты ВЛ в Отделе ТВН НИИ-ИПТ. — Материалы VII Международной научно-технической конф. им. академика Н.Н. Тиходеева, 2014, с. 305–320.

[18.01.16]

А в т о р ы: Куклин Дмитрий Владимирович в 2008 г. окончил физико-энергетический факультет Кольского филиала Петрозаводского государственного университета. Научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра (КНЦ) РАН.

Ефимов Борис Васильевич в 1968 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Методы исследования развитых атмосферных перенапряжений в высоковольтных линиях энергосистем Севера и разработка комплекса мер по повышению надежности их работы» в Санкт-Петербургском государственном техническом университете. Директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 6, pp. 16–21.

Calculation of Curves for Dangerous Parameters for Transmission Towers With High Resistance of Grounding

KUKLIN Dmitrii Vladimirovich (*Center of physical and technical problems of power engineering in Northem (CPhTPPEN) of Russian Academy of Sciences, Appatity, Russia*) — *Research Assistant*
EFIMOV Boris Vasil'yevich (*CPhTPPEN, Appatity, Russia*) — *Director, Dr. Sci. (Eng.)*

For calculations of curves for dangerous parameters an assumption is used according to which insulation voltage drops after the end of lightning current front. However, this assumption is wrong for the groundings with high resistance, therefore in these cases back flashovers are possible at the tail of current. This leads to error of calculations of curves for dangerous parameters and, as a result, to erroneous value of insulation flashover probability. Examples of calculations of curves for dangerous parameters are presented in the article, which allows to estimate level of the error, in addition, values of probability are calculated both with considering flashovers at the tail of current and without it. It is shown that without taking flashovers at the current tail into account a significant error of calculated insulation flashover probability can appear.

Key words: transmission line tower, grounding, dangerous parameters curve, calculation, finite difference method

REFERENCES

1. Razevig D.V. *Atmosfernye perenapryazheniya na liniyakh elektroperedachi* (Atmospheric surges on power lines). Moscow, Publ. Gosenergoizdat, 1959, 216 p.

2. Golginov A.I. *Tekhnika vysokikh napryazhenii v elektroenergetike* (Technics of high voltage in electric power engineering). Moscow, Publ. «Energiya», 1968, 464 p.

3. Borisoglebskii P.V., Dmokhovskaya L.F., Larionov V.P., Pinal' Yu.S., Razevig D.V., Ryabkova Ye.Ya. *Tekhnika vysokikh napryazhenii* (Technics of high voltage). Moscow, Publ. Gosenergoizdat, 1963, 473 p.

4. Kozsuntsev A.V., Pokrovskaya K.I. *Izvestiya Instituta postoyannogo toka — in Russ. (Proc. of Research Institute of direct current)*, 1963, No. 10, pp. 3–17.

5. Korsuntsev A.V., Pokrovskaya K.I. *Elektricheskiye stantsii — in Russ. (Power Plants)*, 1968, No. 11, pp. 63–68.

6. Taflove A., Hagness S.C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Third Edition. Boston: Artech House, 2005, 1006 p.

7. Noda T., Yonezawa R., Yokoyama S., Takahashi Y. Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in FDTD surge simulation. — IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, vol. 19, No. 4, pp. 1913–1918.

8. 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 Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2006, vol. 48, No. 4, pp. 654–660.

9. **LaForest J.J.** Transmission line reference book, 345 kV and above. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1982, 625 p.
10. **Rakov V.A., Borghetti A., Bouquegneau C., Chisholm W.A., Cooray V., Cummins K., Diendorfer G., Heidler F., Hussein A.M., Ishii M., Nucci C.A., Piantini A., Pinto O., Qie X., Rachidi F., Saba M., Shindo T., Schulz W., Thottappillil R., Visacro S.** Lightning parameters for engineering applications. — CIGRE Technical Brochure 549, 2013, 117 p.
11. **Pigini A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G.** Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. — IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, vol. 4, No. 2, pp. 1379–1392.
12. **Caldwell R.O., Darveniza M.** Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. — IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1973, vol. PAS-92, No. 4, pp. 1420–1428.
13. **Chisholm W.A.** New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. — IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, vol. 26, No. 2, pp. 14–25.
14. **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.
15. **Eriksson A., Deller L., Baldo G., Bouquegneau C.H., Darveniza M., Elovaara J., Garbagnati E., Gary C., Grant I., Hileman A., Houlgate R., Huse J., Janischewskyj W., Kawamura T., Popolansky F., Ruhling F., Weck K.-H.** Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. — Paris: CIGRE, 1991, 61 p.
16. **Novikov A.N., Shmarago O.V.** *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konf. Imeni N.N. Tikhodeyeva – in Russ* (Proc. of the VII International Scientific and Research Conf. named N.N. Tikhodeyev), 2014, pp. 305–320.