

Экспериментальное определение наведенных молнией импульсных перенапряжений во вторичных цепях

БОРИСОВ Р.К., ИСАМ М.А. АБДЕЛЬШАФИ, КОЛОМИЕЦ Е.В.

Удары молнии в молниеотводы на территории объектов вызывают появление опасных импульсных перенапряжений в низковольтных кабельных линиях. Амплитудно-частотные характеристики таких перенапряжений определяются расчетным путем, что дает не вполне достоверные результаты. В статье рассмотрено экспериментальное определение наведенных в кабельных линиях перенапряжений при моделировании молнии с помощью разряда вертикального проводника. Приведены результаты экспериментальных исследований при различных условиях: длине вертикального проводника, расстоянии до кабельной линии, наличии нагрузки и устройства защиты от импульсных перенапряжений на конце линии. Установлено, что для получения достоверных результатов при моделировании молнии размеры вертикального проводника должны быть не менее расстояния до кабельной линии. Устройства защиты от импульсных перенапряжений имеют ограниченную зону действия и не защищают длинные кабельные линии от многократных перекрытий изоляции. Эксперименты подтвердили возможность определения наведенных от молнии перенапряжений с помощью разряда вертикального проводника.

К л ю ч е в ы е с л о в а: объект энергетики, удар молнии, импульсные перенапряжения, защита, моделирование

На объектах электроэнергетики, нефтяной и газовой отрасли, промышленности и других объектах в настоящее время применяются современные системы управления, контроля и сигнализации на базе микропроцессорных и электронных устройств. Удары молнии в молниеотводы на территории объекта вызывают появление импульсных перенапряжений в системах электропитания постоянного и переменного тока, в цепях управления и сигнализации, которые могут приводить к повреждению оборудования, сбоям в работе устройств автоматизированных систем управления технологическим процессом и других систем, ответственных за надежную работу объектов, к возникновению аварийных ситуаций [1]. Защита от импульсных перенапряжений осуществляется экранированием кабелей и применением специальных устройств, ограничивающих перенапряжения (диоды, разрядники, варисторы, специальные фильтры). Для правильного выбора способа защиты от импульсных перенапряжений необходимо определять амплитудно-частотные характеристики этих перенапряжений. В настоящее время определение амплитудно-частотные характеристики импульсных перенапряжений в основном выполняется расчетным путем.

Расчетные методы определения наведенных импульсных перенапряжений. Для расчета наведенных перенапряжений в кабельных линиях при ударах молнии в территорию объекта используются компьютерные программы, например, программа «Interference» [2–4]. При разработке модели процесса были использованы сведения о механизме

возникновения индуктированных перенапряжений на линиях электропередачи [5] и экспериментальные данные о воздействии удара молнии на кабельные линии [6].

Модель возникновения наведенных перенапряжений от молнии в кабельной линии представлена на рис. 1.

Электрическая составляющая ЭДС может быть определена по следующему выражению:

$$e(t, s) = \frac{11I(t)h}{\beta s} \left[1 - \frac{1 - \beta^2}{\sqrt{\left(\frac{vt}{s}\right)^2 + 1 - \beta^2}} \right], \quad (1)$$

где $\beta = v/c$, c – скорость света.

Горизонтальная составляющая электрического поля, обусловленная электрическим зарядом канала молнии, определяется как

$$E_h(t, s) = \frac{h(t')I(t')}{2\pi\epsilon_0 v s \sqrt{h^2(t') + s^2}}, \quad (2)$$

а значение ЭДС, индуктируемой на отрезке кабеля длиной l , расположенном на расстоянии s от молнии, составит

$$e_h(t, s) = (\vec{E}_h(t, s) \vec{l}). \quad (3)$$

Магнитная составляющая электрического поля (вертикальная) возникает вследствие электромаг-

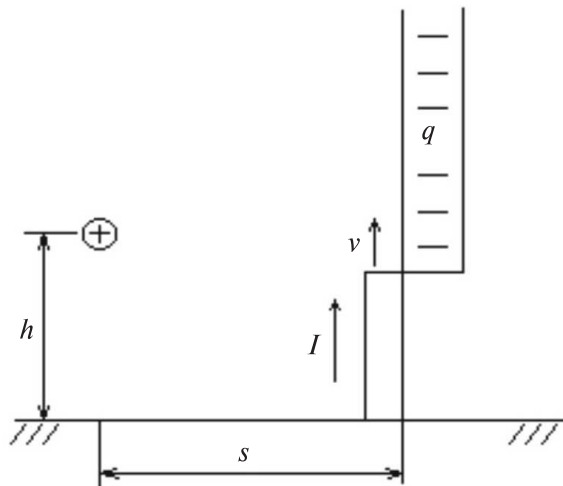


Рис. 1. Модель возникновения наведенных перенапряжений от молнии: h — высота кабельной линии над землей; s — расстояние до места удара молнии; v — скорость распространения волны обратного разряда; q — заряд канала лидера; I — ток молнии

нитного излучения импульсного тока молнии и для любого сечения кабеля может быть вычислена по формуле

$$E_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{v(t-s/c)} \frac{1}{s} \frac{dl(t')}{dt} da, \quad (4)$$

где a — элемент длины лидерного канала; s — расстояние этого элемента от данного сечения кабельной линии.

Магнитная составляющая индуктируемой в данном сечении кабеля ЭДС:

$$e_M = \frac{\mu_0 h}{4\pi} \int_0^{v(t-s/c)} \frac{1}{s} \frac{dl(t')}{dt} da. \quad (5)$$

Кабельная линия разбивается на отдельные участки с сосредоточенными параметрами LRC , в которых по выражениям (3) и (5) определяются наведенные ЭДС и выполняется расчет переходного процесса численными методами.

К сожалению, расчетные методы дают достаточно точные результаты лишь при идеальных условиях, не учитывающих многообразия влияющих реальных параметров: сопротивления грунта, экранирующих эффектов металлоконструкций и других кабельных линий, нагрузки на концах линий и т.п.. Верификация программ фактически не проводится.

Экспериментальные исследования наведенных напряжений. Для имитации помех от молнии рекомендуется [6] использовать замкнутые контуры, через которые при разряде конденсатора пропускается импульс тока. Измеренные во вторичных цепях импульсные помехи при имитационных экспериментах пересчитываются к нормированному импульсу тока молнии. Очевидно, что поле, созданное током в замкнутом контуре сравнительно не-

большого размера, может отличаться от поля тока, проходящего по каналу молнии.

В [8] предложен новый подход к имитации помех от молнии. Были проведены эксперименты, при которых регистрировались импульсные помехи в отрезках кабелей, созданные электромагнитными полями токов в вертикально расположенном проводнике, поддерживаемом проводящей оболочкой (эквивалентный радиус около 1,5 м). В [8] было качественно подтверждено следующее утверждение. Вклад в генерирование помехи от различных частей канала молнии зависит от расстояния от них до какой-то конкретной точки (или области) на территории объекта. Такое заключение базируется на общей теории электромагнитного поля, а также опирается на общеизвестный факт затухания тока молнии при его распространении по каналу главного разряда. Исходя из этих общих соображений можно предположить, что в основном помеха генерируется частями канала молнии, расположенными в непосредственной близости к поверхности земли.

Предложенный в [8] метод экспериментального определения наведенных от молнии импульсных перенапряжений имеет, к сожалению, существенные ограничения: при использовании проводящей оболочки эксперименты можно проводить только при слабом ветре и практически невозможно поддерживать фиксированное расположение проводника относительно вертикали. Эксперименты также показали, что наличие проводящей оболочки практически не влияет на параметры импульса тока. Такая оболочка необходима только для того, чтобы поднимать проводник в вертикальное положение.

Для того чтобы определить влияние длины вертикального проводника на характеристики наведенных перенапряжений, нами были проведены аналогичные эксперименты с моделированием молнии вертикальным проводником различной длины. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

Провод длиной 8,5 м подвешивался вертикально через изолятор к потолку высоковольтного зала. От источника постоянного напряжения провод заряжался через сопротивление 100 МОм до 23 кВ и разряжался через шаровой разрядник на сопротивление 2 кОм, присоединенное к заземляющему устройству. На расстоянии 4 и 10 м прокладывался провод длиной 14 м непосредственно на полу. На конце провода с помощью осциллографа FLUKE 196 снимались осциллограммы напряжения на проводе относительно заземляющего устройства.

Для определения характеристик импульса тока был использован низковольтный источник (8 В) для снижения влияния помех на измерительные цепи. Коммутация осуществлялась механическим контактом заряженного проводника на токовый



Рис. 2. Схема эксперимента

шунт 2 кОм. Осциллограмма импульса тока приведена на рис. 3.

Из-за неустойчивого контакта при коммутации на осциллограмме наблюдается дребезг. Вместе с тем можно определить, что фронт импульса менее 100 нс, а длительность импульса — 600 нс.

Типичная осциллограмма наведённых импульсных напряжений приведена на рис. 4.

Для того чтобы найти минимальную длину вертикально подвешенного провода, при которой дальнейшее увеличение высоты не влияло бы на максимальные значения напряжения помех, длину провода уменьшали с 8,5 до 3,7 м. При уменьшении длины вертикального проводника до 6,5 м максимальное значение наведенного напряжения не меняется, а при длине 4,7 м — изменяется на 15%. При длине вертикального проводника 3,7 м максимальное значение наведенного напряжения уменьшается примерно в 6 раз. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что при имитации молнии с помощью разряда вертикального проводника длина этого проводника должна быть не меньше расстояния до кабельной линии, в которой определяются наведенные перенапряжения.

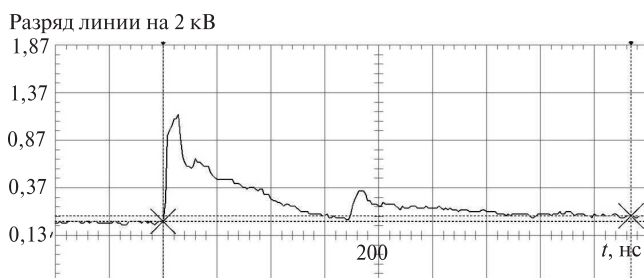


Рис. 3. Осциллограмма импульса тока

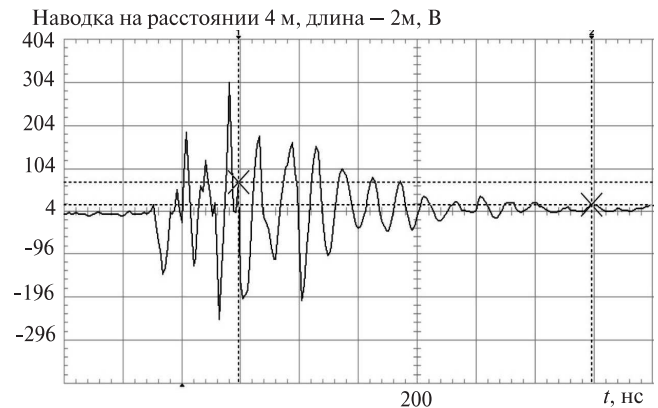


Рис. 4. Осциллограмма напряжения относительно заземляющего устройства в проводнике длиной 14 м на расстоянии 4 м от вертикального проводника

Мероприятия по снижению наведенных перенапряжений. Для снижения наведенных перенапряжений в [9] рекомендуется: увеличивать расстояние от молниеотводов до кабельных линий, применять экранирование кабелей, устанавливать устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП).

При увеличении расстояния от вертикального проводника с 4 до 10 м максимальное значение наведенных перенапряжений уменьшается примерно в 4 раза, что соответствует расчетной модели. Измерения подтвердили, что экранирование проводов приводит к уменьшению наведенных напряжений. К такому же результату приводит также уменьшение их высоты над землей.

Низкоомная нагрузка снижает уровень наведенных перенапряжений на том конце проводника, где она установлена, но на другом конце перенапряжения не снижаются. Также в месте установки УЗИП перенапряжения снижаются до допустимых значений, но действие их ограничивается определенным расстоянием. Эксперименты показали, что при наведенных перенапряжениях в десятки киловольт в проводнике происходят многократные перекрытия изоляции по всей длине проводника (рис. 5).

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для определения наведенных в кабельных линиях импульсных перенапряжений от молнии можно использовать разряд вертикального проводника. Длина вертикального проводника должна быть не менее расстояния до кабельной линии. Зарядное напряжение проводника выбирается из условий проведения экспериментов и составляет более 10 кВ.



Рис. 5. Многократные перекрытия изоляции по всей длине проводника

Устройства защиты от импульсных перенапряжений имеют ограниченную зону действия и не устраняют пробой изоляции кабелей по длине линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Жуков А.В., Кужекин И.П. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике/Под ред. А.Ф. Дьякова. — М.: Энергоатомиздат, 2003, 768 с.
2. Петров С.Р. Расчет импульсных помех в проводах и кабельных линиях. — Технологии ЭМС, 2006, № 1, с. 19–26.
3. Petrov S.R., Borisov R.K., Kolechitskie Y.S., Lightning protection on open substations. — Proc. of Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP2000), Greece, 18–27 Sept. 2000, p. 629.
4. Petrov S.R., Fortov V.A., Parfenov V.V., Borisov R.K., Sduhov L.N. A computer code for estimating pulsed electromagnetic disturbances penetrating into building power and earthing circuits.—Proc. of the 14th Intern. Zurich Simp. EMC, 2001, p. 312.
5. Техника высоких напряжений/Под ред. Д.В. Разевига. — М.: Энергия, 1976, 488 с.
6. Rubinstein M., Uman M.A. Review of the University of Florida research on lightning induced voltages on power distribution

lines. — Proc. of the 21st Intern. Conf. on Lightning Protection (Berlin), 1992, p. 79.

7. СО 34.35.311.2004. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. — М.: Изд-во МЭИ, 2004, 75 с.

8. Борисов Р.К., Колечицкий Е.С., Коломиец Е.В. Новый подход к моделированию импульсных помех во вторичных цепях электрических подстанций. — Электричество, 2007, № 12, с. 51–53.

[31.07.2017]

А в т о р ы: **Борисов Руслан Константинович** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Национальный исследовательский университет — «НИУ «МЭИ») в 1971 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) «НИУ «МЭИ».

Исам М.А. Абдельшафи окончил Киевский политехнический институт в 2003 г. Аспирант кафедры ТЭВН «НИУ «МЭИ».

Коломиец Евгений Владимирович окончил Институт электротехники «НИУ «МЭИ» в 2002 г. Инженер кафедры ТЭВН «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 10, pp. 69–72

DOI:10.24160/0013-5380-2017-10-69-72

Experimental Determination of Lightning-Induced Surge Overvoltages in Secondary Circuits

BORISOV Ruslan K. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» («NRU «MPEI»), Moscow, Russia*) — *Leading scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)*

ABDELSHAFI ISAM M.A. (*«NRU «MPEI»», Moscow, Russia*) — *Ph. D. Student*

KOLOMIYETS Eugene V. (*«NRU «MPEI»», Moscow, Russia*) — *Engineer*

Lightning strokes hitting lightning diverters located on the territory of facilities may induce the occurrence of dangerous surge overvoltages in low-voltage cable lines. The amplitude-frequency responses of such overvoltages are determined by calculation, which yields insufficiently reliable results. A method for experimentally determining surge overvoltages induced in cable lines by modeling of lightning in the form of discharge from a vertical conductor is considered. The article presents the results from experimental investigations carried out under different conditions in terms of the vertical conductor's length, distance to the cable line, and availability of load and a surge overvoltage protection device at the line end. It has been determined that, in order to obtain reliable results in modeling of lightning, the vertical conductor's size shall be no less than the distance to the cable line. Surge overvoltage protection devices have a limited coverage area and do not protect long cable lines from multiple flashovers of their insulation. The obtained experimental results have confirmed the possibility of determining the lightning-induced overvoltages by means of discharge from a vertical conductor.

Key words: *power facility, lightning stroke, surge overvoltages, protection, modeling*

REFERENCES

1. D'yakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike/ Pod red. A.F. D'yakova* (Electromagnetic compatibility in power engineering and electrical engineering/Edit by A.F. D'yakov). Moscow, Energoatomizdat, 2003, 768 p.
2. Petrov S.R. *Tekhnologii EMS — in Russ. (Electromagnetic compatibility technologies)*, 2006, No. 1, pp. 19–26.
3. Petrov S.R., Borisov R.K., Kolechitskii Y.S., Lightning protection on open substations. — Proc. of Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP2000), Greece, 18–27 Sept. 2000, p. 629.
4. Petrov S.R., Fortov V.A., Parfenov V.V., Borisov R.K., Sduhov L.N. A computer code for estimating pulsed electromagnetic disturbances penetrating into building power and earthing circuits.—Proc. of the 14th Intern. Zurich Simp. EMC, 2001, 312 p.

5. *Technica vysokikh napryazhenii/ Pod red. D.V. Razeviga* (High voltage technics/Edit. by D.V. Razevig). Moscow, Publ. «Energiya», 1976, 488 p.

6. Rubinstein M., Uman M.A. Review of the University of Florida research on lightning induced voltages on power distribution lines. Proc. of the 21st Intern. Conf. On Lightning Protection. Berlin, 1992, 79 p.

7. СО 34.35.311.2004. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu elektromagnitnoi obstanovki i sovmestimosti na elektricheskikh stantsiyakh i podstantsiyakh* (Methodological guidelines for the definition...). — Moscow, Publ. MPEI, 2004, 75 p.

8. Borisov R.K., Kolechitskii Ye.S., Kolomiyets Ye.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2007, No. 12, pp. 51–53.

[31.07.2017]