

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132

УДК 621.311.4-742

Методы измерения влияний молнии путем имитации ее ударов с интервальной оценкой результатов измерений

П. В. Криксин¹⁾

¹⁾ООО «АЭСАТ Электрик» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Представлены результаты разработки новых методов более точной интервальной оценки экспериментальных значений напряжений, возникающих при ударах молнии в молниеотводы, на заземляющих устройствах подстанций и в цепях контрольных кабелей, позволяющие повысить достоверность полученных данных молниевых помех на 28 %. Более точные значения интервальной оценки достигнуты за счет разработки модели измерений, учитывающей наряду с измеряемыми величинами различные погрешности измерений, и специальной обработки результатов измерений. В результате этого интервал нахождения истинного значения искомого напряжения определен с точностью 95 %. Методы могут быть использованы для измерительных комплексов ИК-1 и ИКП-1, состоящих из генератора апериодических импульсов, генератора высокочастотных импульсов и селективных вольтметров соответственно. Для оценки эффективности указанных методов выполнены серии экспериментальных оценок напряжения на заземляющих устройствах десяти действующих высоковольтных подстанций по разработанным и традиционным методам. Результаты оценок подтвердили возможность определения истинных значений напряжений в широком диапазоне, что необходимо учитывать в процессе технической диагностики молниезащиты подстанций при анализе результатов измерений и разработке мероприятий по снижению влияний молнии. Также сравнительный анализ результатов измерений по разработанным и традиционным методам показал, что истинное значение искомого напряжения может превышать измеренное на величину до 28 %, что необходимо учитывать при дальнейшем анализе параметров молниезащиты на объекте и разработке корректирующих мероприятий. Методы апробированы при обследовании электромагнитной обстановки на 27 действующих высоковольтных электрических подстанциях с открытым распределительным устройством 110 кВ. Применение методик позволило повысить точность собираемой информации, правильность оценки электромагнитной обстановки высоковольтных подстанций с ОРУ 110 кВ, эффективность адекватных разрабатываемых мероприятий по защите от влияний молнии.

Ключевые слова: имитационное моделирование, интервальная оценка, молния, молниезащита, подстанция

Для цитирования: Криксин, П. В. Методы измерения влияний молнии путем имитации ее ударов с интервальной оценкой результатов измерений / П. В. Криксин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 2. С. 118–132. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132

Адрес для переписки

Криксин Павел Васильевич
ООО «АЭСАТ Электрик»
ул. Логойская, 19, комн. 9,
220053, Минский р-н, д. Валерьяново,
Республика Беларусь
Тел.: +375 29 606-22-21
kriksinpavel@gmail.com

Address for correspondence

Kriksin Pavel V.
The “AESAT Electric” Limited Liability Company
19 room 9, Logoiskaya str.,
220053, Minsk rayon, the village of Valeryanovo,
Republic of Belarus
Tel.: +375 29 606-22-21
kriksinpavel@gmail.com

Methods of Measuring the Effects of Lightning by Simulating its Strikes with the Interval Assessment of the Results of Measurements

P. V. Kriksin¹⁾

¹⁾The “AESAT Electric” Limited Liability Company” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of the development of new methods aimed at more accurate interval estimate of the experimental values of voltages on grounding devices of substations and circuits in the control cables, that occur when lightning strikes to lightning rods; the above-mentioned estimate made it possible to increase the accuracy of the results of the study of lightning noise by 28 %. A more accurate value of interval estimation were achieved by developing a measurement model that takes into account, along with the measured values, different measurement errors and includes the special processing of the measurement results. As a result, the interval of finding the true value of the sought voltage is determined with an accuracy of 95 %. The methods can be applied to the IK-1 and IKP-1 measurement complexes, consisting in the aperiodic pulse generator, the generator of high-frequency pulses and selective voltmeters, respectively. To evaluate the effectiveness of the developed methods series of experimental voltage assessments of grounding devices of ten active high-voltage substation have been fulfilled in accordance with the developed methods and traditional techniques. The evaluation results confirmed the possibility of finding the true values of voltage over a wide range, that ought to be considered in the process of technical diagnostics of lightning protection of substations when the analysis of the measurement results and the development of measures to reduce the effects of lightning are being fulfilled. Also, a comparative analysis of the results of measurements made in accordance with the developed methods and traditional techniques has demonstrated that the true value of the sought voltage may exceed the measured value at an average of 28 %, that ought to be considered in the further analysis of the parameters of lightning protection at the facility and in the development of corrective actions. The developed methods have been tested in surveys of the electromagnetic environment of 27 active high voltage electric substations with a 110 kV outdoor switchgear. The application of the techniques amended the accuracy of the information collected, the correctness of the evaluation of the electromagnetic environment of high-voltage substations with a 110 kV outdoor switchgear, the effectiveness of the developed adequate measures to protect against lightning effects.

Keywords: simulation, interval estimation, lightning, lightning protection, substation

For citation: Kriksin P. V. (2017) Methods of Measuring the Effects of Lightning by Simulating its Strikes with the Interval Assessment of the Results of Measurements. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (2), 118–132. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-118-132 (in Russian)

Введение

Молния – одно из наиболее мощных и распространенных природных явлений, которые представляют опасность для низковольтных систем высоковольтных электрических подстанций. Оказываемые молнией влияния разнообразны и зависят от большого числа факторов: параметров тока молнии, грунтов, заземлителей, расстояний между объектами и др. К настоящему времени разработано достаточно аналитических методов [1–3], которые по определенным данным позволяют оценить величину и опасность влияния молнии. Вместе с тем очень часто погрешность таких оценок недопустимо велика, что главным образом связано с низкой достоверностью исходной информации. В действительности параметры удельного сопротивления

грунта, заземлителей и прочих элементов без выполнения измерений на конкретном объекте не могут быть определены с высокой точностью, поэтому весьма часто их оценка проводится только качественно.

Решение описанных трудностей возможно за счет применения методов имитационного моделирования, которые позволяют воспроизводить влияния молнии, близкие к реальным, но гораздо меньшей величины. Имитационное моделирование широко применяется на практике при выполнении работ по обследованию электромагнитной обстановки высоковольтных электрических подстанций [1, 2]. Способами имитационного моделирования можно также изучать влияния молнии. Вместе с тем предлагаемые в литературе методы имитационного моделирования не позволяют оценить неопределенность измеренной величины, т. е. возможный диапазон нахождения ее истинного значения. Решение указанной задачи приводится в настоящей статье. Способ нахождения неопределенности измеренной величины установлен для следующих влияний молнии: напряжения на заземляющем устройстве (ЗУ) и напряжения в кабелях вторичных цепей при имитации ударов молнии в молниеотводы высоковольтных электрических подстанций с открытым распределительным устройством (ОРУ) 110 кВ.

Методика № 1. Моделирование и расчет неопределенности измерений напряжений на заземляющем устройстве высоковольтной электрической подстанции при имитации ударов молнии в молниеотводы

Известно, что при ударе молнии в молниеотвод, заземлитель которого совмещен с заземлителем подстанции, ток распределяется по такому единому заземлителю и стекает в грунт. В связи с тем что заземлитель имеет сопротивление, напряжение на нем распределяется неравномерно. В результате между различными точками ЗУ возникает напряжение, которое может представлять опасность для контрольных кабелей, электрического и электронного оборудования. Существуют различные способы оценки величины напряжения, одним из которых является имитация ударов молнии в молниеотводы подстанции генератором аperiodических импульсов (ГАИ), форма тока которого аналогична току молнии, но имеет гораздо меньшую величину, и измерение величины напряжения, обусловленного током генератора, вольтметром импульсным (ВИ), с приведением результатов измерений к реальной величине тока молнии.

Величина определяемого напряжения $U_{вл}$, приведенного к реальному току молнии, с учетом возможных погрешностей измерения описывается следующей формулой [5, 6]:

$$U_{вл} = \frac{(U_{изм} - U_{изм.ф})(1 + \delta U_{изм} + \delta U_{изм.г})}{I_{г}(1 + \delta I_{г})} I_{м}, \quad (1)$$

где $U_{изм}$ – измеренная величина напряжения при имитации удара молнии, В; $U_{изм.ф}$ – то же фонового напряжения, В; $\delta U_{изм}$ – неопределенность, обу-

словленная погрешностью ВИ, о. е.; $\delta U_{\text{изм.т}}$ – то же, обусловленная температурной нестабильностью отношения измеренной величины напряжения к измеренной величине тока, о. е.; I_r – измеренная величина импульса тока ГАИ при имитации удара молнии, А; δI_r – неопределенность, обусловленная погрешностью ГАИ, о. е.; I_m – величина тока молнии, определяемая классом молниезащиты объекта, А.

Для имитации ударов молнии и измерения напряжений применяли приборы ГАИ и ВИ, входящие в состав измерительного комплекса ИК-1. Примеры имеют следующие метрологические характеристики:

- ГАИ: форма генерируемого импульса – аperiodическая; длительность фронта генерируемых импульсов в режиме холостого хода по уровню 0,1–0,9 амплитуды – $(1,2 \pm 0,1)$ мкс; длительность генерируемых импульсов в режиме холостого хода по уровню 0,5 амплитуды – (50 ± 5) мкс; максимальная величина генерируемого импульса 20 А; предел допускаемого значения относительной погрешности измерения амплитуды импульсов тока – не более $\pm 10\%$;

- ВИ: диапазоны измерения амплитуды импульсов напряжения – от 0,5 до 5,0 В, от 5 до 50 В, от 50 до 200 В; предел допускаемого значения основной относительной погрешности измерения амплитуды импульсов напряжения – не более $\pm 10\%$; дополнительная температурная погрешность – не более $\pm 3\%$.

Схема измерений показана на рис. 1.

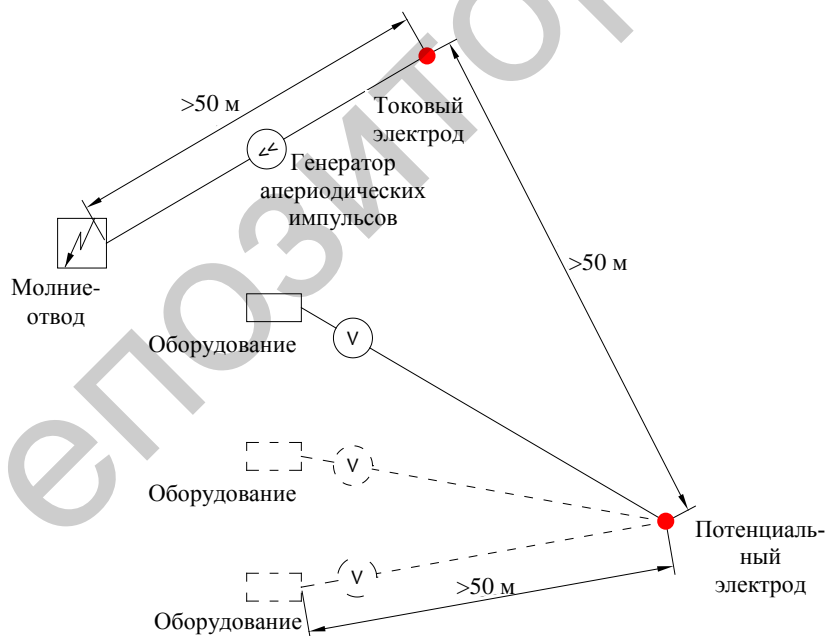


Рис. 1. Схема моделирования и измерения влияний молнии

Fig. 1. The circuit simulation and measurement of the effects of lightning

Стандартная процедура выполнения измерений имеет следующую последовательность [2]: одним выходом генератор подключается к заземляющему устройству молниеприемника, второй выход подключается к заземлителю на расстоянии не менее 50 м от молниеприемника; ВИ подключается между точками измерения напряжения (между двумя точками ЗУ, или между измеряемой точкой и удаленной землей, имитируемой заземлителем, расположенным на расстоянии не менее 50 м от измеряемой точки в направлении, противоположном точке заземления генератора); измеряется фоновое напряжение; включается генератор и имитируется ток молнии с параметрами волны 1,2/50 мкс; измеряется напряжение в исследуемых точках.

Измеренные по схеме на рис. 1 величины обрабатываются, на основании чего выполняется оценка неопределенности искомой величины напряжения $U_{\text{вл}}$. Для этих целей рассчитываются средняя величина и стандартная неопределенность измеренных фонового напряжения $U_{\text{изм.ф}}$, тока генератора I_{Γ} и напряжения на заземляющем устройстве $U_{\text{изм}}$ по следующим формулам:

$$U_{\text{изм.ф}} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_{\text{изм.ф}i}, \quad i = 1, \dots, n_1; \quad (2)$$

$$u(\bar{U}_{\text{изм.ф}}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{\text{изм.ф}i} - \bar{U}_{\text{изм.ф}})^2}, \quad i = 1, \dots, n_1; \quad (3)$$

$$\bar{I}_{\Gamma} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} I_{\Gamma i}, \quad i = 1, \dots, n_2; \quad (4)$$

$$u(\bar{I}_{\Gamma}) = \sqrt{\frac{1}{n_2(n_2-1)} \sum_{i=1}^{n_2} (I_{\Gamma i} - \bar{I}_{\Gamma})^2}, \quad i = 1, \dots, n_2; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{\text{изм}} = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} U_{\text{изм}i}, \quad i = 1, \dots, n_3; \quad (6)$$

$$u(\bar{U}_{\text{изм}}) = \sqrt{\frac{1}{n_3(n_3-1)} \sum_{i=1}^{n_3} (U_{\text{изм}i} - \bar{U}_{\text{изм}})^2}, \quad i = 1, \dots, n_3, \quad (7)$$

где n_1, n_2, n_3 – количество результатов измерений, шт.; $\bar{U}_{\text{изм.ф}}$ – среднее значение измеренного фонового напряжения, В; $u(\bar{U}_{\text{изм.ф}})$ – стандартная

неопределенность измерения фонового напряжения, В; $\bar{I}_Г$ – среднее значение измеренного тока генератора, А; $u(\bar{I}_Г)$ – стандартная неопределенность измерения тока генератора, А; $\bar{U}_{изм}$ – среднее значение измеренного напряжения, В; $u(\bar{U}_{изм})$ – стандартная неопределенность измерения напряжения, В.

Величины в формулах (2)–(7) имеют следующие свойства:

- фоновое напряжение $U_{изм.ф}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{изм.ф}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{изм.ф})$;

- измеренное напряжение $U_{изм}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{изм}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{изм})$;

- измеренный ток $I_Г$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{I}_Г$; стандартная неопределенность – $u(\bar{I}_Г)$;

- неопределенность измерения напряжения $\delta U_{изм}$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_{изм} = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_{изм}) = 0,1/\sqrt{3}$;

- неопределенность измерения тока $\delta I_Г$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{I}_Г = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{I}_Г) = 0,1/\sqrt{3}$;

- неопределенность из-за температурной нестабильности $\delta U_{изм.т}$: тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_{изм.т} = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 3)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_{изм.т}) = 0,03/\sqrt{3}$.

Показатели в (2)–(7) рассматриваются как некоррелированные.

За оценку измеряемой величины взято среднее арифметическое значение напряжения $\bar{U}_{вл}$

$$\bar{U}_{вл} = \frac{\bar{U}_{изм} - \bar{U}_{изм.ф}}{\bar{I}_Г} I_M. \quad (8)$$

Коэффициенты чувствительности для величин в (2)–(7) получим путем вычисления частных производных:

$$c_1 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial U_{\text{изм.ф}}} = -\frac{I_{\text{м}}}{I_{\Gamma}}; \quad c_2 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial U_{\text{изм}}} = \frac{I_{\text{м}}}{I_{\Gamma}};$$

$$c_3 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial(\delta U_{\text{изм}})} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\Gamma}} I_{\text{м}}; \quad c_4 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial(\delta U_{\text{изм.т}})} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\Gamma}} I_{\text{м}};$$

$$c_5 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial I_{\Gamma}} = \frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\Gamma}} I_{\text{м}}; \quad c_6 = \frac{\partial U_{\text{вл}}}{\partial(\delta I_{\Gamma})} = -\frac{\bar{U}_{\text{изм}} - \bar{U}_{\text{изм.ф}}}{\bar{I}_{\Gamma}} I_{\text{м}}.$$

Исходя из этого вклады в неопределенность составят:

$$u_1(U_{\text{вл}}) = c_1 u(\bar{U}_{\text{изм.ф}}); \quad u_2(U_{\text{вл}}) = c_2 u(\bar{U}_{\text{изм}});$$

$$u_3(U_{\text{вл}}) = c_3 u(U_{\text{изм}}); \quad u_4(U_{\text{вл}}) = c_4 u(U_{\text{изм.т}});$$

$$u_5(U_{\text{вл}}) = c_5 u(\bar{I}_{\Gamma}); \quad u_6(U_{\text{вл}}) = c_6 u(\delta I_{\Gamma}).$$

Суммарная стандартная неопределенность при измерении $U_{\text{вл}}$

$$u_c(U_{\text{вл}}) = \sqrt{u_1^2(U_{\text{вл}}) + u_2^2(U_{\text{вл}}) + u_3^2(U_{\text{вл}}) + u_4^2(U_{\text{вл}}) + u_5^2(U_{\text{вл}}) + u_6^2(U_{\text{вл}})}. \quad (9)$$

Расширенную неопределенность измерения $U_{\text{вл}}$ определим для уровня доверия $p = 95\%$ при коэффициенте охвата $k = 2,0$ о. е.

$$D_{U_{\text{вл}}} = k u_c(U_{\text{вл}}).$$

Конечный результат измерения будет иметь следующий вид:

$$U_{\text{вл}} = U_{\text{вл}} \pm D_{U_{\text{вл}}} \quad (k = 2,0; \quad p = 95\%).$$

Пример измерений и расчетов распределения напряжений по ЗУ при ударе молнии в молниеотвод для подстанции приведен на рис. 2.

Выполнены имитация ударов молнии в молниеотвод МО1 и измерения напряжений на ЗУ относительно молниеотвода МО1 и оперативного пункта управления (ОПУ). Полученные результаты измерений и расчетов показаны на рис. 3.

Результаты измерений фонового напряжения $U_{\text{фм}i}$, тока генератора $I_{\Gamma i}$, напряжения на ЗУ $U_{\text{м}i}$ для одной серии имитаций ударов молнии приведены в табл. 1.

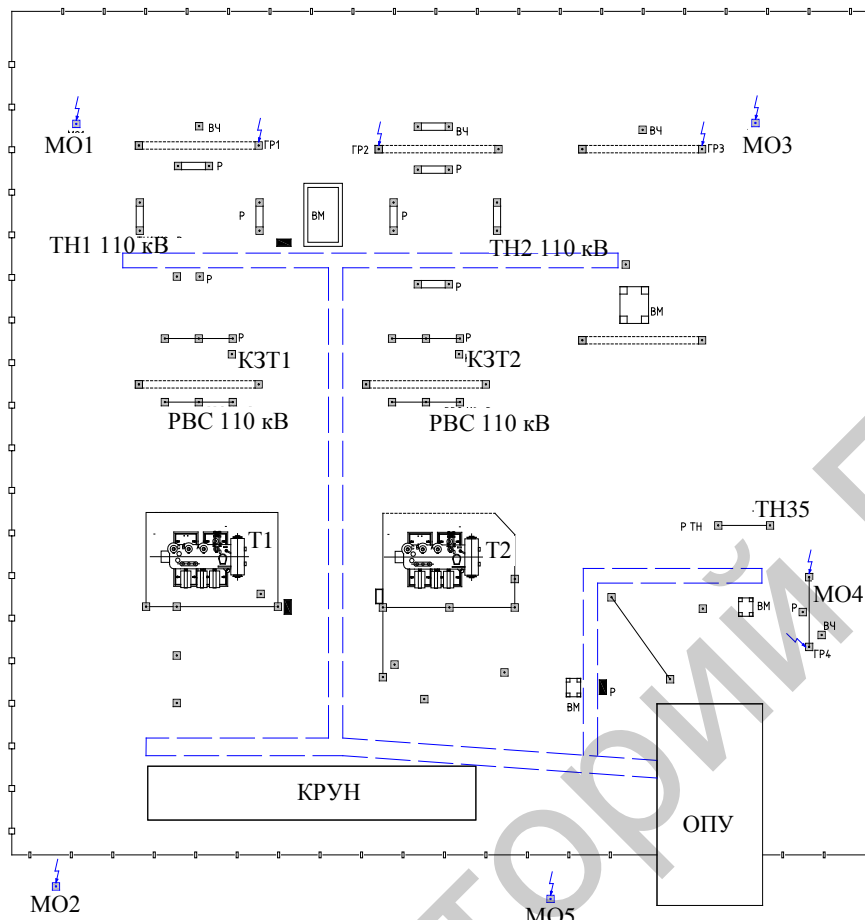


Рис. 2. План подстанции

Fig. 2. Substation plan

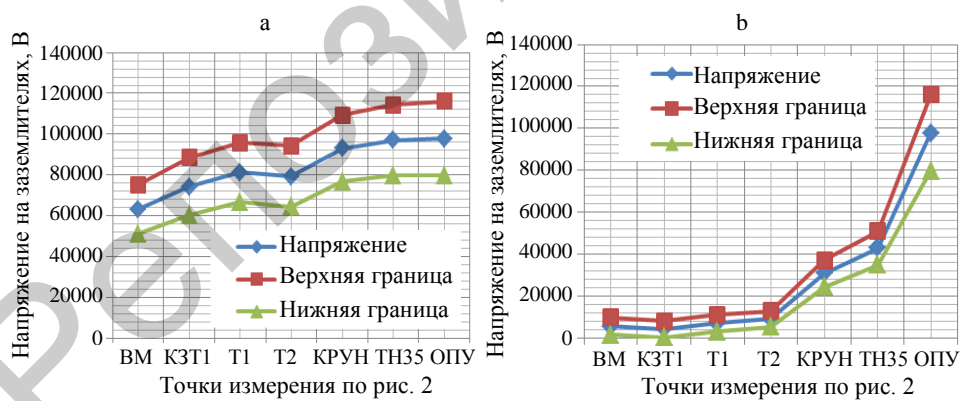


Рис. 3. Результаты измерений и расчетов напряжений на заземляющем устройстве при имитации ударов молнии в молниеотвод MO1 относительно: а – MO1; б – оперативного пункта управления

Fig. 3. The results of measurements and calculations of voltage on a grounding device while a lightning strike on a lightning rod MO1 with regard to: a – MO1; b – an operational control

Таблица 1

Результаты измерений
The results of the measurements

| Точка имитации удара молнии | $U_{\text{фмi}}, \text{ В}$ | Длительность фронта импульса, мкс | $I_{\text{Гi}}, \text{ А}$ | $U_{\text{мi}}, \text{ А}$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| МО1 | 0,24 | 1,2 | 5,6 | 5,8 |
| | 0,15 | | 5,8 | 5,9 |
| | 0,11 | | 5,1 | 5,3 |
| | 0,18 | | 5,4 | 4,9 |
| | 0,09 | | 5,3 | 5,5 |

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности
The results of calculations of the parameters of the uncertainty budget

| Величина x_i | Значение оценки x_i | Интервал $\pm r$ | Тип неопределенности | Распределение вероятностей | Стандартная неопределенность $u(x_i)$ | Коэффициент чувствительности c_i | Вклад неопределенности $u_i(y), \text{ В}$ |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| $U_{\text{м}}, \text{ В}$ | 5,48 | – | А | Нормальное | 0,180 | 18382 | 3309 |
| $U_{\text{фм}}, \text{ В}$ | 0,15 | – | А | Нормальное | 0,027 | –18382 | –488 |
| $\delta U_{\text{м}}, \text{ о. е.}$ | 0,00 | 0,10 | В | Равномерное | 0,058 | 97904 | 5653 |
| $\delta U_{\text{мГ}}, \text{ о. е.}$ | 0,00 | 0,03 | В | Равномерное | 0,017 | 97904 | 1696 |
| $I_{\text{Г}}, \text{ А}$ | 5,44 | – | А | Нормальное | 0,121 | –17997 | –2175 |
| $\delta I_{\text{Г}}, \text{ о. е.}$ | 0,00 | 0,10 | В | Равномерное | 0,058 | –97904 | –5653 |
| $U_{\text{вл}}, \text{ В}$ | 97904 | – | – | – | – | – | 9094 |

Итог выражается как результат измерений плюс-минус расширенная неопределенность

$$97904 \pm 18187 \text{ В.}$$

Аналогичным образом разработана методика выполнения измерений напряжений, возникающих в кабелях вторичных цепей при ударах молнии в молниеотводы подстанции.

Методика № 2. Моделирование и расчет неопределенности измерений напряжений в кабелях вторичных цепей высоковольтной электрической подстанции при имитации ударов молнии в молниеотводы

Известно, что при протекании тока молнии по проводникам вокруг них возникает высокая напряженность электромагнитного поля, которая посредством электромагнитной индукции наводит токи и напряжения в проводящих элементах, в том числе в кабелях вторичных цепей [7, 8]. В том случае, если кабели вторичных цепей подключены к электронным техническим средствам, возникающие в цепях помехи оказываются приложен-

ными к их портам. Результатами действия помех являются сбои в работе или повреждения электронных технических средств [9, 10].

Величина напряжений, наводимых в кабелях вторичных цепей, может быть определена методами имитационного моделирования путем имитации удара молнии в молниеотвод генератором высокочастотных импульсов (ГВЧИ) и измерения наводимых в проводниках напряжений посредством вольтметра (ВИ-6М). Необходимые для моделирования генератор и вольтметр входят в состав измерительного комплекса ИК-1 и имеют следующие метрологические характеристики:

- ГВЧИ: форма генерируемого тока – затухающие колебания с частотой генерируемого импульса $(0,50 \pm 0,05)$ МГц, $(1,0 \pm 0,1)$ МГц, $(2,0 \pm 0,2)$ МГц, с частотой следования генерируемого импульса (10 ± 2) Гц; верхний предел измерения 10 А на частоте 0,5 МГц, 8 А – на частоте 1 МГц, 5 А – на частоте 2 МГц; значение относительной погрешности измерения амплитуды генерируемого тока – не более $\pm 10\%$;

- ВИ-6М: диапазоны измерения амплитуды импульсов напряжения – до 5 В, от 5 до 50 В, от 50 до 200 В; предел допускаемого значения основной относительной погрешности измерения амплитуды импульсов напряжения – не более $\pm 10\%$.

Величина определяемого наведенного напряжения $U_{ин.вл}$, приведенного к реальному току молнии, с учетом возможных погрешностей измерения описывается следующей формулой:

$$U_{ин.вл} = \frac{(U_k - U_{фк})(1 + \delta U_n)}{I_r (1 + \delta I_r)} I_m, \quad (10)$$

где U_k , $U_{фк}$ – амплитуды измеренного в кабеле напряжения при включенном и выключенном генераторе соответственно, В; δU_n – погрешность измерения ВИ-6М, о. е.; I_r – амплитуда генерируемого ГВЧИ тока, А; δI_r – погрешность измерения ГВЧИ, о. е.

Имитация ударов молнии выполняется для существующих молниеприемников и кабелей вторичных цепей. Для измерения выбираются кабельные трассы, расположенные наиболее близко и на наибольшем протяжении по отношению к молниеотводам. В каждой трассе выбирают типовые виды кабелей: с экраном, без экрана, с наименьшим и наибольшим числом жил. Кабели подбирают таким образом, чтобы в них имелись свободные или рабочие жилы с нагрузкой на удаленном от молниеотвода конце не менее 1 кОм (разомкнутый контакт). Стандартная процедура выполнения измерений имеет следующую последовательность: ВИ-6М подключают одним выходом к измеряемой жиле, а вторым – к корпусу устройства, к которому подходит жила кабеля; выполняют измерение фоновых напряжений; ГВЧИ одним концом подключают к заземлителю молниеприемника, а вторым – к его конструкции так, чтобы путь протекания тока проходил вдоль кабеля, на котором выполняются измерения помех; включают ГВЧИ и имитируют протекание тока молнии на различных частотах;

измеряют значение тока, генерируемого ГВЧИ, и величину напряжения в измеряемых цепях.

Измеренные величины обрабатываются, и выполняется оценка неопределенности искомой величины напряжения $U_{ин.вл}$. Для этого рассчитываются средняя величина и стандартная неопределенность измеренных фоновых напряжений $U_{фк}$, тока генератора $I_{г}$ и напряжения $U_{к}$ по следующим формулам:

$$\bar{U}_{фк} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_{фкi}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (11)$$

$$u(\bar{U}_{фк}) = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (U_{фкi} - \bar{U}_{фк})^2}, \quad i=1, \dots, n_1; \quad (12)$$

$$\bar{I}_{г} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} I_{гi}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (13)$$

$$u(\bar{I}_{г}) = \sqrt{\frac{1}{n_2(n_2-1)} \sum_{i=1}^{n_2} (I_{гi} - \bar{I}_{г})^2}, \quad i=1, \dots, n_2; \quad (14)$$

$$\bar{U}_{к} = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} U_{кi}, \quad i=1, \dots, n_3; \quad (15)$$

$$u(\bar{U}_{к}) = \sqrt{\frac{1}{n_3(n_3-1)} \sum_{i=1}^{n_3} (U_{кi} - \bar{U}_{к})^2}, \quad i=1, \dots, n_3, \quad (16)$$

где n_1, n_2, n_3 – количество результатов измерений, шт.; $\bar{U}_{фк}$ – среднее значение измеренного фоновых напряжений, В; $u(\bar{U}_{фк})$ – стандартная неопределенность измерения фоновых напряжений, В; $\bar{I}_{г}$ – среднее значение измеренного тока генератора, А; $u(\bar{I}_{г})$ – стандартная неопределенность измерения тока генератора, А; $\bar{U}_{к}$ – среднее значение измеренного напряжения, В; $u(\bar{U}_{к})$ – стандартная неопределенность измерения напряжения, В.

Величины в формулах (11)–(16) имеют следующие свойства:

- фоновое напряжение $U_{фк}$: тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – $\bar{U}_{фк}$; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_{фк})$;

• измеренное напряжение U_k : тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – \bar{U}_k ; стандартная неопределенность – $u(\bar{U}_k)$;

• измеренный ток I_r : тип неопределенности – А; вид распределения – нормальное; значение оценки – \bar{I}_r ; стандартная неопределенность – $u(\bar{I}_r)$;

• неопределенность измерения напряжения δU_k : тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{U}_k = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{U}_k) = 0,1/\sqrt{3}$;

• неопределенность измерения тока δI_r : тип неопределенности – В; вид распределения – равномерное; значение оценки – $\delta \bar{I}_r = 0$; интервал, в котором находится значение величины, – $(\pm 10)\%$; стандартная неопределенность – $u(\delta \bar{I}_r) = 0,1/\sqrt{3}$.

Исследуемые параметры рассматриваются как некоррелированные. За оценку измеряемой величины берется среднее арифметическое значение напряжения

$$\bar{U}_{\text{ин.вл}} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{\text{фк}}}{I_r} I_M. \quad (17)$$

Коэффициенты чувствительности для величин в (11)–(16) получим путем вычисления частных производных:

$$c_1 = \frac{\partial U_{\text{ин.вл}}}{\partial U_{\text{фк}}} = -\frac{I_M}{I_r}; \quad c_2 = \frac{\partial U_{\text{ин.вл}}}{\partial U_k} = \frac{I_M}{I_r}; \quad c_3 = \frac{\partial U_{\text{ин.вл}}}{\partial (\delta U_n)} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{\text{фк}}}{I_r} I_M;$$

$$c_4 = \frac{\partial U_{\text{ин.вл}}}{\partial I_r} = \frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{\text{фк}}}{I_r} I_M; \quad c_5 = \frac{\partial U_{\text{ин.вл}}}{\partial (\delta I_r)} = -\frac{\bar{U}_k - \bar{U}_{\text{фк}}}{I_r} I_M.$$

Исходя из этого вклады в неопределенность составят:

$$u_1(U_{\text{ин.вл}}) = c_1 u(\bar{U}_{\text{фк}}); \quad u_2(U_{\text{ин.вл}}) = c_2 u(\bar{U}_k); \quad u_3(U_{\text{ин.вл}}) = c_3 u(U_n);$$

$$u_4(U_{\text{вл}}) = c_4 u(\bar{I}_r); \quad u_5(U_{\text{вл}}) = c_5 u(\delta I_r).$$

Суммарная стандартная неопределенность при измерении $U_{\text{ин.вл}}$

$$u_c(U_{\text{ин.вл}}) = \sqrt{u_1^2(U_{\text{ин.вл}}) + u_2^2(U_{\text{ин.вл}}) + u_3^2(U_{\text{ин.вл}}) + u_4^2(U_{\text{ин.вл}}) + u_5^2(U_{\text{ин.вл}})}. \quad (18)$$

Расширенную неопределенность измерения $U_{\text{ин.вл}}$ определим для уровня доверия $p = 95\%$ при коэффициенте охвата $k = 2,0$ о. е.

$$D_{U_{ин.вл}} = ku_c (U_{ин.вл}).$$

Конечный результат измерения будет иметь следующий вид:

$$U_{ин.вл} = U_{ин.вл} \pm D_{U_{ин.вл}} \quad (k = 2,0; p = 95 \%).$$

Пример измерений и расчетов напряжений в цепях вторичных кабелей при имитации ударов молнии в молниеотвод с оценкой неопределенности их находжений для подстанции приведен на рис. 2. Имитация ударов молнии проведена для всех молниеотводов подстанции (МО1–МО5). Измерения напряжений выполнены в цепи кабеля, проложенного от ВМ 110 кВ до ОПУ. Для пересчета напряжений приняты следующие параметры молнии: первый импульс 100,0 кА частотой 1,0 МГц, последующий импульс 25,0 кА частотой 2,0 МГц.

Полученные результаты измерений и расчетов показаны на рис. 4.

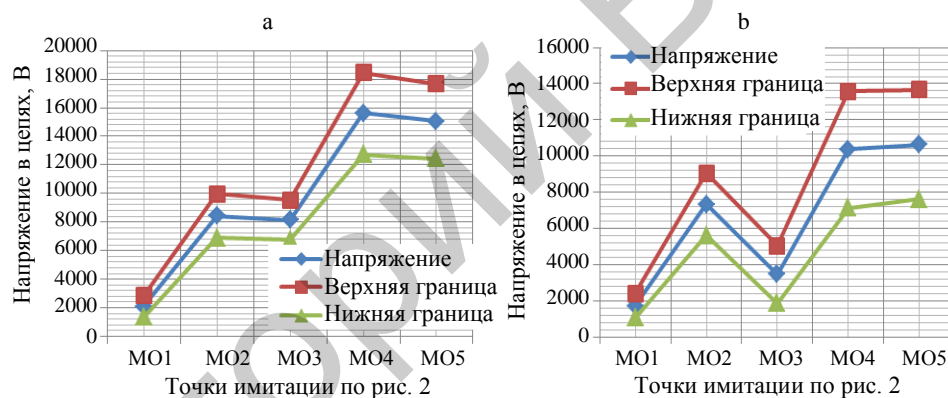


Рис. 4. Результаты измерений и расчетов напряжений в цепях при имитации ударов молнии в молниеотводы: а – первый удар молнии; б – последующий удар молнии

Fig. 4. The results of measurements and calculations of voltages in the circuit caused by simulating lightning strikes on lightning rods: а – first lightning strike; б – subsequent lightning strike

Результаты измерений фонового напряжения $U_{фпi}$, тока генератора $I_{Гi}$, напряжения в цепях $U_{пi}$ для одной серии имитаций ударов молнии приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений
The results of the measurements

| Кабель | Точка имитации ударов молнии | $U_{фпi}$, В | f , МГц | $I_{Гi}$, А | $U_{пi}$, В | $I_{Мi}$, А |
|------------|------------------------------|---------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Цепи в ОПУ | МО1 | 0,35 | 1 | 6,6 | 0,47 | 100000 |
| | | 0,30 | | 6,3 | 0,39 | |
| | | 0,31 | | 6,2 | 0,49 | |
| | | 0,29 | | 6,1 | 0,42 | |
| | | 0,31 | | 6,3 | 0,45 | |

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности показаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов параметров бюджета неопределенности
The results of calculations of the parameters of the uncertainty budget

| Величина x_i | Значение оценки x_i | Интервал $\pm r$ | Тип неопределенности | Распределение вероятностей | Стандартная неопределенность $u(x_i)$ | Коэффициент чувствительности c_i | Вклад неопределенности $u_i(y)$, В |
|------------------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| $U_{п}$, В | 0,44 | – | A | Нормальное | 0,018 | 15873 | 282,16 |
| $U_{фп}$, В | 0,31 | – | A | Нормальное | 0,010 | –15873 | –161,87 |
| $\delta U_{п}$, о. е. | 0,00 | 0,10 | B | Равномерное | 0,058 | 2095,2 | 121,0 |
| I_T , А | 6,30 | – | A | Нормальное | 0,084 | –333 | –27,8 |
| δI_T , о. е. | 0,00 | 0,10 | B | Равномерное | 0,058 | –2095 | –121,0 |
| Определяемое значение $U_{мн}$, В | 2095 | – | – | – | – | – | 369 |

Итог выражается как результат измерений плюс-минус расширенная неопределенность: 2095 ± 737 В.

ВЫВОДЫ

1. Получаемые по предложенной методике более точные экспериментальные результаты позволяют повысить достоверность оценок электромагнитных влияний молнии и улучшить качество разрабатываемых корректирующих мероприятий.

2. Результаты исследований рекомендуются к применению в следующей практической деятельности: предпроектные обследования подстанций для сбора информации о текущем состоянии молниезащиты, приемосдаточные испытания молниезащиты и при ее периодической инспекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзен. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. Rakov, V. A. Lightning. Physics and Effects / V. A. Rakov, M. A. Uman. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687 p.
3. Петров, С. Р. Компьютерные программы для анализа и проектирования устройств заземления и молниезащиты / С. Р. Петров, Р. К. Борисов // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сб. докл. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – С. 41–43.
4. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства: Стандарт организации СТО 56947007-29.240.044–2010. Введ. 21.04.2010. М.: ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2010. 147 с.
5. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях: Стандарт организации СО 34.35.311–2004 / Российское открытое акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России». М.: Изд-во МЭИ, 2004. 78 с.

6. Кострикин, А. М. Проблемы электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики и пути их решения / А. М. Кострикин, П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2010. № 3. С. 44–45.
7. Криксин, П. В. Моделирование и анализ процессов, происходящих при стекании тока молнии в грунт / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2012. № 2. С. 14–19.
8. Криксин, П. В. Обследование электромагнитной обстановки на электрических подстанциях. Теория и практика / П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2011. № 3. С. 25–35.
9. Криксин, П. В. Вторичные влияния молнии. Как она поражает электронику предприятий / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2014. № 1. С. 34–40.
10. Фурсанов, М. И. Криксин П. В. Моделирование и анализ токов в заземляющих устройствах электроустановок / М. И. Фурсанов, П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2010. № 3. С. 16–21.

Поступила 30.05.2016 Подписана в печать 03.08.2016 Опубликовано онлайн 07.03.2017

REFERENCES

1. Bazylyan E. M., Raizen Yu. P. (2001) *Physics of Lightning and Lightning Protection*. Moscow, Fizmatlit Publ. 320 (in Russian).
2. Rakov V. A., Uman M. A. (2003) *Lightning. Physics and Effects*. Cambridge, Cambridge University Press. 687. DOI: 10.1017/CBO9781107340886.
3. Petrov S. R., Borisov R. K. (2002) Computer Programs for Analysis and Design of Grounding and Lightning Protection. *Pervaia Rossiiskaia Konferentsiia po Zazemliaiushchim Ustroistvam: Sb. Dokl.* [First Russian Conference on Grounding Devices. Collected Presentations]. Novosibirsk, Siberian Energy Academy, 41–43 (in Russian).
4. Open Joint Stock Company “Federal Grid Company of Unified Energy System”. Standard of the Organization 56947007-29.240.044–2010 (2010). Methodical Instructions for Ensuring Electromagnetic Compatibility at Electric Grid Facilities. Moscow. 147 (in Russian).
5. Standard of Organizatiuon “Russian Joint Stock Company of Power and Electrification of Russia” 34.35.311–2004 (2004) Methodical Instructions for Dtermining of the Electromagnetic Environment and Compatibility in Power Stations and Substation. Moscow, Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute. 78 (in Russian).
6. Kostrikin A. M., Kriksin P. V. (2010) Problems of Electromagnetic Compatibility at Electric Power Facilities and Ways to Solve them. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 44–45 (in Russian).
7. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2012) Modeling and Analysis of the Processes Occurring in the Drainage of the Lightning Current into the Ground. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 14–19 (in Russian).
8. Kriksin P. V. (2011). The Survey of Electromagnetic Environment at Electric Substations. Theory and Practice. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 25–35 (in Russian).
9. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2014) Secondary Effects of Lightning. How it Affects Electronic Devices of Eneterprises. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (1), 34–40 (in Russian).
10. Fursanov M. I., Kriksin P. V. (2010) Modeling and Analysis of Currents in the Grounding Devices of Electric Installations. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (3), 16–21 (in Russian).

Received: 30 May 2016

Accepted: 3 August 2016

Published online: 7 March 2017