

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-191–202

УДК 621.311.4-742

Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций

М. И. Фурсанов¹⁾, П. В. Криксин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ООО «АЭСАТ Электрик» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Представлены результаты исследований влияния молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций с открытыми распределительными устройствами 110 кВ. Актуальность исследований обусловлена широким распространением таких подстанций, высокими требованиями к надежности их работы, а также повсеместным распространением и высокой вероятностью ударов молнии в подстанции или вблизи них. Наиболее вероятные и опасные влияния молнии на низковольтные системы подстанции определены на основании критического обзора и анализа литературных источников, систематизации практической информации, собранной при обследовании эксплуатируемых подстанций. Для установленного перечня опасных влияний на основе физических процессов молнии разработаны адекватные физико-математические модели. Модель каждого влияния исследована на основании теории чувствительности. Достоверность и адекватность моделей подтверждены путем сопоставления результатов расчетов по исследуемым моделям с результатами расчетов по специализированным программам, а также с практическими или теоретическими данными, полученными другими авторами. Изучены факторы, входящие в состав моделей, определены их природа (естественный или искусственный) и диапазон возможных значений в условиях подстанции, рассчитаны коэффициенты эластичности. Полученные результаты позволяют установить вклад фактора во влияние молнии и возможность управления фактором. Взаимосвязь между факторами и влияниями молнии показана в виде графов. Для практического применения информация, полученная в результате исследований, систематизирована в виде контрольных перечней, которые можно применять при сборе исходной информации с целью разработки молниезащиты подстанции, обследования ее существующей молниезащиты, расследования аварийных ситуаций, связанных с ударами молнии. Результаты исследований использовались на практике при предпроектных обследованиях подстанций, разработке задания на проектирование, проектировании молниезащиты подстанции, в процессе приемосдаточных испытаний и периодической инспекции молниезащиты.

Ключевые слова: низковольтные системы, высоковольтные электрические подстанции, молния, распределительное устройство

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций / М. И. Фурсанов, П. В. Криксин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 191–202

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Fursanov Mikhail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
elsyst@bntu.by

The Effect of Lightning on High Voltage Electrical Substations' Low Voltage Systems

M. I. Fursanov¹⁾, P. V. Kriksin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾The "AESAT Electric" Limited Liability Company (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of studies of the effects of lightning on low voltage systems of high voltage electrical substations with outdoor switchgears of 110 kV. The topicality of research is associated with a wide spreading of such substations as well as with a high reliability requirements of their work and, also, with their widespread distribution and high probability of lightning strikes to the substation or around it. The highest probable and the most dangerous effects of lightning on low voltage systems of a substation are determined on the basis of critical review and special literature analysis and, also, of systematization of practical information that had been collected during the survey of operating substations. Adequate physical models were developed for the list of hazardous effects based on physical processes of lightning. A model of each effect was studied on the basis of the sensitivity theory. The accuracy and adequacy of the models were verified by means of comparison of calculation results for the models under investigation with the results of calculations fulfilled in accordance with specialized programs, as well as from practical or theoretical data obtained by other authors. The factors that had been included in the models were studied and were defined in accordance with their nature (natural or artificial), the range of possible values in a substation was determined; the coefficients of elasticity were calculated. The obtained results enable to ascertain the contribution of the factor in the effect of lightning and the ability to control the factor. The relationship between the factors and the effects of lightning are shown as graphs. For practical application the information, obtained as the result of the research, was organized in the form of checklists that can be applied when collecting baseline information to develop the lightning protection of the substation, to examine the existing lightning protection, to investigate emergency situations associated with lightning strikes. The results of the study were used in practice during the pre-design survey of substations, development of the design assignment, design of lightning protection of a substation, and during fulfillment of acceptance tests and periodic inspections of lightning protection.

Keywords: low voltage systems, high voltage electric substations, lightning, switchgear

For citation: Fursanov M. I., Kriksin P. V. (2016) The Effect of Lightning on High Voltage Electrical Substations' Low Voltage Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 191–202 (in Russian)

Молния – мощное природное явление, представляющее опасность практически для всех расположенных на Земле объектов. В статье представлены результаты анализа влияний молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций (далее – ПС) с открытыми распределительными устройствами 110 кВ (далее – ОРУ 110 кВ). Подстанции данного типа распространены в Республике Беларусь, являются важнейшими составляющими системы передачи и распределения электрической энергии. Подстанции с ОРУ 110 кВ занимают большую площадь (как правило, 10000 м² и более), высота расположенных на них сооружений составляет 11 м и более, что определяет высокую вероятность их поражения прямыми ударами молнии. Также высока вероятность заноса тока молнии на подстанцию по грозозащитным тросам воздушных линий электропередачи. Кроме того, на ПС с ОРУ 110 кВ широко используются различные низковольтные системы (устройства релейной защиты и автоматики, система собственных нужд, система постоянного оперативного тока, связь и т. п.)

с малым уровнем помехоустойчивости. Большинство низковольтных систем выполняют ответственные функции, сбой в работе которых может привести к прерыванию технологического процесса. Для исключения сбоев в работе низковольтных систем должны предусматриваться мероприятия по обеспечению их электромагнитной совместимости с электромагнитной обстановкой, в частности защита систем от электромагнитных влияний молнии. Анализ показал, что структура влияния молнии имеет следующий вид: влияние молнии, объект влияния молнии, механизм связи между ними (рис. 1).



Рис. 1. Структура влияния молнии

Fig. 1. The structure of influence of a lightning

Объекты влияния – это низковольтные системы электрических ПС: устройства релейной защиты и автоматики, устройства системы собственных нужд, устройства системы постоянного оперативного тока, связь, приборы регистрации и измерения. Влияния молнии и механизмы связи являются предметом исследований. В статье приводятся результаты критического обзора литературных источников, физико-математического моделирования влияний молнии, а также их функциональный анализ, результаты натурных измерений, инженерных расчетов и расчетов по специализированным компьютерным программам.

Анализ показал, что влияния молнии на низковольтные системы подстанции с ОРУ 110 кВ с наибольшей вероятностью происходят при ее ударе в молниеотводы подстанции и грозозащитные тросы высоковольтных линий электропередачи. По данным [1, 2] и из практического опыта установлено, что в результате названных событий возникают:

- повышение напряжения на конструкции молниеотвода, что приводит к повреждению:
 - расположенного на молниеотводе электрического оборудования;
 - электрических цепей на молниеотводе и распространению по ним потенциала;
 - электрического оборудования, расположенного рядом;
 - близлежащих контрольных кабелей;
- повышение напряжения на заземлителе молниеотвода и, следовательно:
 - повреждение расположенных вблизи заземлителей контрольных кабелей;
 - повреждение расположенного вблизи оборудования;
 - вынос потенциала по заземляющему устройству или расположенным рядом с молниеотводом проводящим элементам и повреждение удаленных от молниеотвода оборудования и цепей;
- неравномерное распределение потенциала по заземляющему устройству, что приводит к:
 - термическому перегреву проводников, заземленных в разных точках подстанции;

повреждению изоляции протяженных кабелей, экраны которых заземлены в разных точках подстанции;

- излучаемые электромагнитные поля, обусловленные протеканием тока молнии по молниеотводу, что ведет к:

повреждению или ухудшению работы низковольтного оборудования; появлению помех в контрольных кабелях.

Перечисленные влияния могут быть систематизированы следующим образом:

- перенапряжения на заземлителе молниеотвода при стекании с него тока молнии;
- искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя;
- перенапряжения на конструкции пораженного молнией объекта;
- перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией;
- перенапряжения на металлических оболочках при протекании по ним тока молнии;
- перенапряжения на проводниках, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс;
- напряжения и токи в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии.

Для названных влияний молнии исследована физика процесса, разработана и верифицирована адекватная математическая модель, изучены входящие в модель факторы: определены их природа и возможный диапазон значений.

Исследуемая модель представлена в виде функции Y из n переменных $(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$ [3]:

$$Y = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n), \quad (1)$$

где $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$ – факторы, определяющие величину влияния молнии.

Для оценки влияния фактора x_j на величину Y вычисляется коэффициент чувствительности s_j [3]

$$s_j = \frac{\partial Y}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Максимальное приращение значения ΔY при изменении исследуемого фактора на величину Δx_j определяется следующим образом:

$$\Delta Y = \sum_{j=1}^n s_j \Delta x_j. \quad (3)$$

Оценка вклада x_j в величину влияния Y выполняется на основании коэффициентов эластичности [3]

$$\delta_j = \frac{\partial Y}{\partial x_j} \frac{x_j}{Y} = s_j \frac{x_j}{Y}. \quad (4)$$

Коэффициент эластичности δ_j показывает, на сколько процентов изменится функция Y при изменении факторной переменной на 1 %. В связи с тем что исследуемые функции нелинейные, величина коэффициента эластичности не имеет определенного значения, поэтому его расчет выполняется для всей области возможных значений фактора, что позволяет построить функциональные зависимости изменения коэффициента эластичности от изменения фактора и коэффициента эластичности от изменения влияния Y . Полученные зависимости дают возможность оценить вклад фактора в величину влияния Y в любой области значений фактора или влияния.

Приведем пример влияния, вызванного перенапряжениями на заземлителе молниеотвода, возникающими при ударе молнии в молниеотвод. Перенапряжения появляются вследствие наличия сопротивления, которое встречает ток молнии при стекании с заземлителя в грунт. При этом поведение заземлителя при стекании с него мощного импульсного тока молнии имеет ряд отличительных особенностей, в частности это процессы ионизации, индуктивные и емкостные связи, которые необходимо учитывать при анализе [4–6]. Указанная физика процесса может быть описана следующей функцией импульсного напряжения:

$$U_{\text{имп}} = f(I_{\text{м(3)}}, \alpha_{\text{и}}, R_{\text{п}}), \quad (5)$$

где $I_{\text{м(3)}}$ – ток молнии, стекающий с заземлителя молниеотвода в грунт, А; $\alpha_{\text{и}}$ – импульсный коэффициент, учитывающий особенности поведения заземлителя при протекании по нему тока молнии, о. е.; $R_{\text{п}}$ – сопротивление заземлителя молниеотвода постоянному току, Ом.

Составляющие функции (5) также являются зависимыми переменными и имеют вид:

$$I_{\text{м(3)}} = f(I_{\text{м}}, n_{\text{т}}); \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{и}} = f(S_3, \rho, I_{\text{м}}); \quad (7)$$

$$R_{\text{п}} = f(\rho, L, n, S, d_1, d_2, H, l), \quad (8)$$

где $n_{\text{т}}$ – число токоотводов молниеотвода, шт.; $I_{\text{м}}$ – ток молнии, кА; S_3 – площадь заземлителя молниеотвода, м²; ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; L – суммарная длина горизонтальных заземлителей, м; H – глубина прокладки горизонтальных заземлителей, м; n – число вертикальных заземлителей, шт.; l – длина одного вертикального заземлителя, м; d_1, d_2 – диаметр горизонтального и вертикального заземлителя соответственно, м.

Проверка адекватности анализируемой модели выполнена путем сопоставления ручных расчетов и по специализированной программе «ОРУ-М» (разработана МЭИ (ТУ), РАО «ЕЭС России», рег. ном. в Роспатенте 2002611768). Расчеты проведены для различных значений удельного сопротивления грунта (от 100 до 1000 Ом·м), тока молнии (30, 50, 100 кА),

для заземлителей следующего вида: простой заземлитель молниеотвода с конфигурацией по требованиям [7]: четырехлучевой заземлитель с длиной каждого луча 3 м, на концах лучей – электроды длиной 3 м, глубина прокладки заземлителей 0,7 м, материал – сталь круглая диаметром 12 мм; сложный заземлитель молниеотвода, совмещенный с сетчатым заземляющим устройством подстанции площадью $100 \times 100 \text{ м}^2$ с шагом сетки $20 \times 20 \text{ м}$. Полученные функциональные зависимости импульсного сопротивления от величины удельного сопротивления грунта для токов молнии 30, 50, 100 кА показаны на рис. 2.

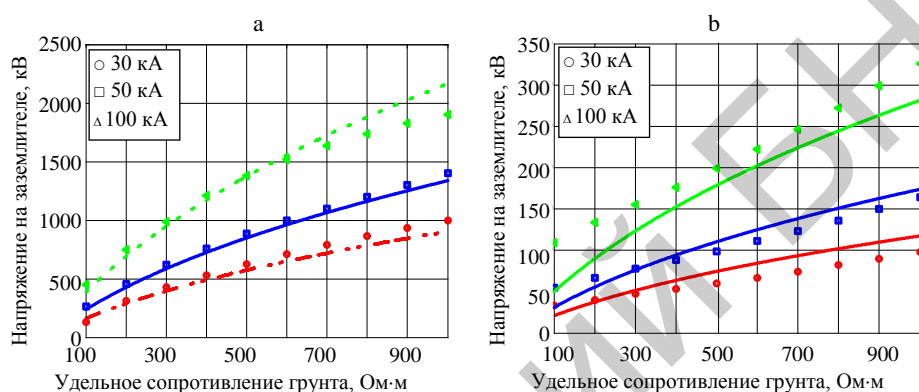


Рис. 2. Зависимость напряжения на заземлителе от удельного сопротивления грунта при разных значениях тока молнии (инженерный и компьютерный расчеты): а – простая модель; б – сложная модель; знаками \circ , \square , \triangle отмечены результаты расчетов по компьютерной программе при токах 30, 50, 100 кА соответственно; сплошные линии – результаты расчетов по принятой модели

Fig. 2. Dependence of voltage on the earthing upon soil resistivity at different values of the lightning current (manual and computer calculations): а – a prime model; б – a complex model; the results of calculations on the program at currents 30, 50, 100 кА are noted by the signs \circ , \square , \triangle respectively; solid lines – demonstrate the results of calculations in accordance with the model adopted

Анализ расчетов показал, что импульсное напряжение имеет одинаковый тренд при изменении удельного сопротивления грунта и тока молнии, максимальная разность полученных значений составляет 18 и 14 % для простого и сложного заземлителей соответственно. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что исследуемая модель адекватно и с достаточной точностью отражает рассмотренный процесс.

На следующем этапе проанализированы факторы, составляющие модель, изучена их природа (искусственная или естественная). Искусственными факторами можно управлять (параметры заземлителей, конфигурация и т. п.), естественные факторы можно только учитывать (величина тока молнии, удельное сопротивление грунта и т. п.). Определен диапазон возможных значений факторов в условиях высоковольтной подстанции на основании практического опыта и анализа литературных источников. Рассчитаны коэффициенты эластичности факторов и построены графические зависимости коэффициентов эластичности от изменения факторов и величины рас-

сма­три­вае­мо­го вли­я­ния. При­мер на­зван­ных гра­фиче­ских за­ви­си­мо­стей фак­то­ров функ­ции (5) от из­ме­не­ния $U_{\text{имп}}$, $I_{\text{м(3)}}$, $\alpha_{\text{н}}$ по­ка­зан на рис. 3.

Ре­зуль­та­ты рас­че­тов све­де­ны в гра­ф на рис. 4, где по­ка­зан воз­мож­ный диа­па­зон из­ме­не­ния фак­то­ров (ми­ни­маль­ное и ма­кси­маль­ное зна­че­ния) и диа­па­зон из­ме­не­ния коэф­фи­ци­ен­тов эла­сти­ч­но­сти для со­став­ляю­щих и са­мой функ­ции вли­я­ния (ми­ни­маль­ное, сре­д­нее и ма­кси­маль­ное зна­че­ния).

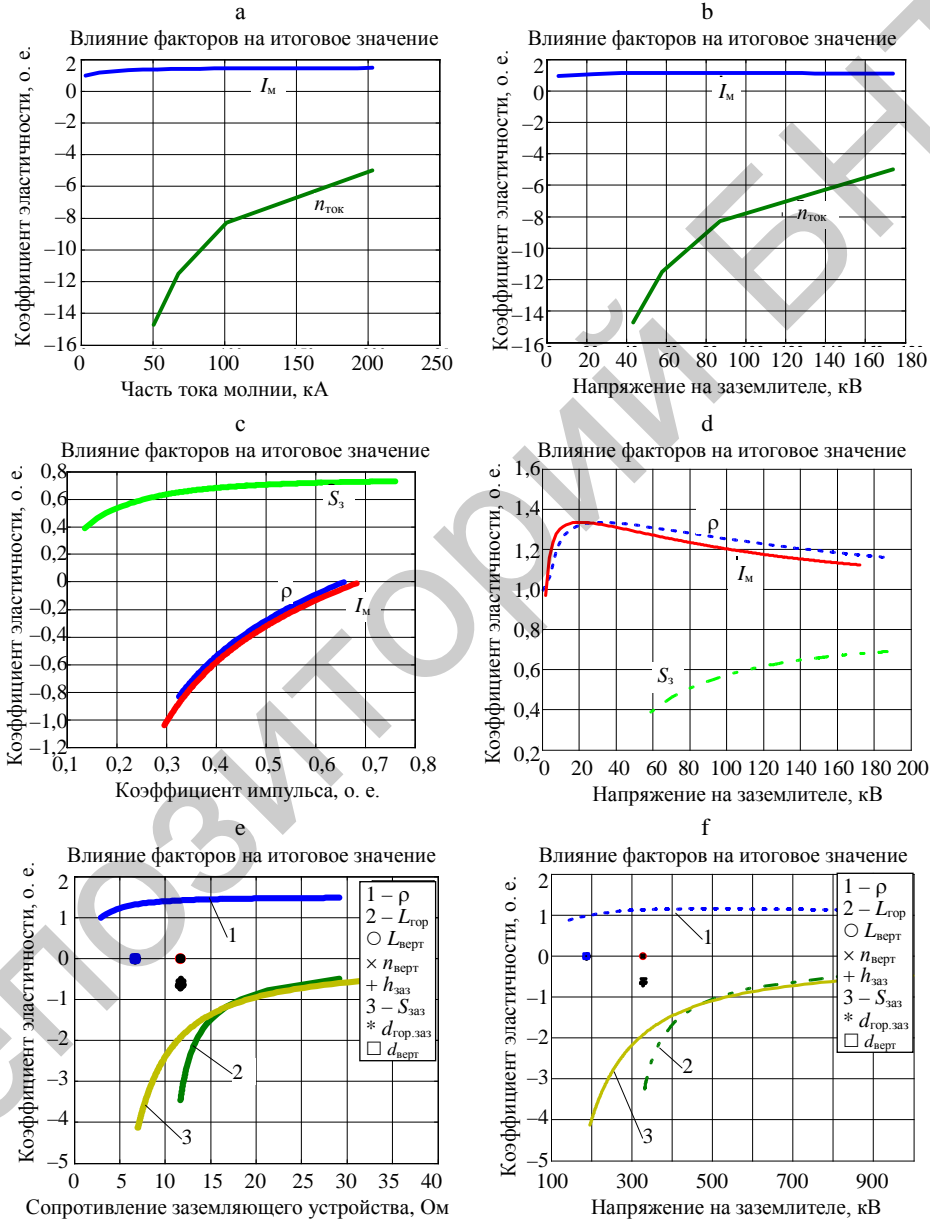


Рис. 3. Коэффициенты эластичности факторов функции (5):

a – $I_{\text{м(3)}}$; b, d, f – $U_{\text{имп}}$; c – $\alpha_{\text{н}}$; e – $R_{\text{ст}}$

Fig. 3. The coefficient of elasticity of function (5) factors are:

a – $I_{\text{м(3)}}$; b, d, f – $U_{\text{имп}}$; c – $\alpha_{\text{н}}$; e – $R_{\text{ст}}$

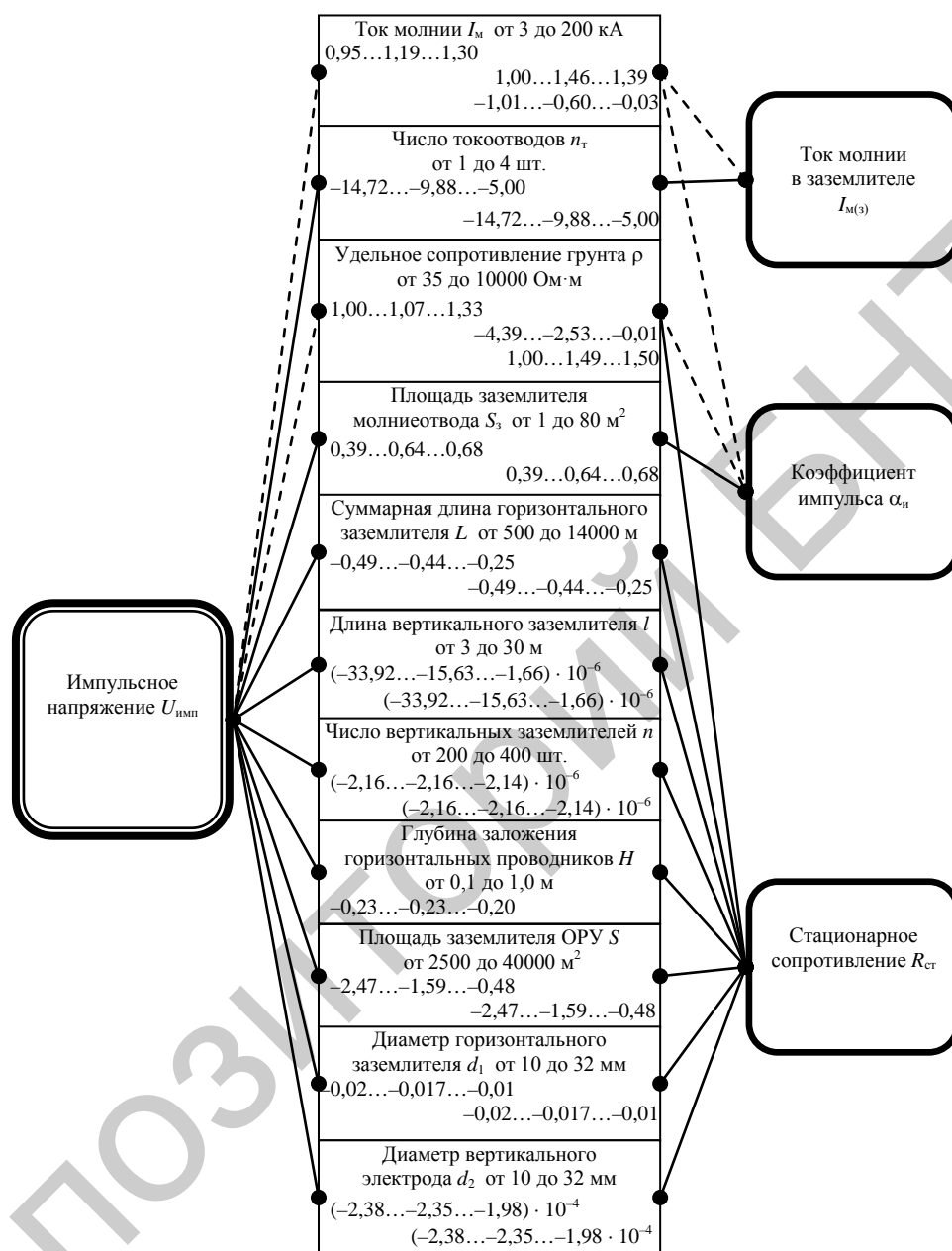


Рис. 4. Связь между факторами и влияниями молнии

Fig. 4. The relationship between the factors and events of a lightning

Пояснения в рамках на рис. 4 указывают название фактора, возможный диапазон его изменения и числовые значения коэффициента эластичности (минимальное значение ... среднее ... максимальное) для каждой рассматриваемой функции; пунктирная линия – естественные факторы, сплошная – искусственные факторы.

Кроме приведенного выше, выполнена систематизация факторов функции (5) по степени их влияния на модель и по их природе [8–11], а именно:

- природные факторы, которые необходимо контролировать: ток молнии, удельное сопротивление грунта;

- искусственные факторы, которыми возможно управлять: число токоотводов, площадь заземляющего устройства подстанции, площадь заземляющего устройства молниеотвода, суммарная длина горизонтальных заземлителей, глубина погружения горизонтальных заземлителей, диаметр горизонтального заземлителя, диаметр вертикального заземлителя, длина вертикального заземлителя, число вертикальных заземлителей.

Аналогичным образом проведены исследования прочих влияний молнии:

- искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя (модель описывается функцией $r_{\text{и}}$ радиуса искровой зоны)

$$r_{\text{и}} = f(I_{\text{м}}, n_{\text{т}}, l, \rho, E_{\text{пр}}), \quad (9)$$

где l – длина заземлителя, м; $E_{\text{пр}}$ – пробивная напряженность грунта, В/м;

- перенапряжения на конструкции пораженного молнией объекта (модель процесса описывается функцией магнитной составляющей индуктированного напряжения $U_{\text{м}}$, электрической составляющей индуктированного напряжения $U_{\text{эл}}$, составляющей падения электрического напряжения $U_{\text{э}}$):

$$U_{\text{м}} = f(a, h, h', r_3, v_{\text{т}}, t); \quad (10)$$

$$U_{\text{эл}} = f(a, h, h', r_3, v_{\text{т}}, t), \quad (11)$$

где a – скорость изменения тока молнии, А/с; h – высота рассматриваемого объекта, м; h' – высота точки, для которой рассчитывается перенапряжение, м; r_3 – эквивалентный радиус токопровода, м; $v_{\text{т}}$ – скорость перемещения прямоугольной волны заряда вдоль канала молнии, м/с; t – длительность разряда, с;

- перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией (модель процесса описывается магнитной $U_{\text{м2}}$ и электрической $U_{\text{э2}}$ функциями, электростатической составляющей напряжения $U_{\text{эст}}$):

$$U_{\text{м2}} = f(h_{\text{об}}, \partial i, \partial t, d, r_{\text{т}}); \quad (12)$$

$$U_{\text{э2}} = f(R_{\text{в3}}, I_{\text{м(2)}}); \quad (13)$$

$$U_{\text{эст}} = f(C, R_3, h, I_{\text{м}}, d), \quad (14)$$

где ∂i – величина импульса тока фронта молнии, А; ∂t – длительность фронта импульса, с; $h_{\text{об}}$ – высота непораженного объекта, м; d – расстоя-

ние между объектами, м; r_t – усредненный радиус непораженного объекта, м; $R_{вз}$ – сопротивление заземления между объектом и молниеотводом, Ом; $I_{м(2)}$ – часть тока молнии, протекающего по заземлителю, кА; C – емкость объекта, пФ; R_3 – сопротивление заземления объекта, Ом; h – высота рассматриваемого объекта, м; d – расстояние от точки удара до объекта, м;

- перенапряжения на металлических оболочках $U_{обол}$ при протекании по ним тока молнии

$$U_{обол} = f(R_0, I_M, \rho, \tau_B), \quad (15)$$

где R_0 – удельное сопротивление экрана, Ом/м; τ_B – время спада импульса тока молнии до половины амплитуды, мкс;

- перенапряжения на проводниках $U_{пзп}$, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс

$$U_{пзп} = f(R_0, I_M, \rho); \quad (16)$$

- напряжения $U_{оп}$ и токи $I_{зп}$ в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии:

$$U_{оп} = f(I_M, T_1, h_B, e, f, d_B, \eta, K_s, K_c, r); \quad (17)$$

$$I_{зп} = f(I_M, T_1, h_B, e, f, d_B, \eta, K_s, K_c, r), \quad (18)$$

где h_B – ширина или высота витка, м; e – длина витка, м; f – расстояние от канала разряда до стены сооружения, м; d_B – расстояние от витка до стены сооружения, м; η – коэффициент экранирования для экрана сооружения (экран LPZ 1); K_s – коэффициент экранирования, учитывающий экранирующий эффект экрана кабеля, о. е.; K_c – коэффициент, который учитывает распределение тока между идущими вниз проводниками; r – радиус проводника в витке, м.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты исследований влияний молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций с открытыми распределительными устройствами 110 кВ.

2. Разработаны, верифицированы и проанализированы физико-математические модели следующих влияний молнии: перенапряжения на заземлителе молниеотвода при стекании с него тока молнии; искровой пробой при стекании тока молнии с заземлителя; перенапряжения на конструкции

пораженного молнией объекта; перенапряжения между двумя объектами, один из которых поражен молнией; перенапряжения на металлических оболочках при протекании по ним тока молнии; перенапряжения на проводниках, прокладываемых для дополнительной защиты вдоль кабельных трасс; напряжения и токи в петлях проводников, которые возникают при дистанционных влияниях молнии.

3. Изучены факторы моделей (определена природа: естественный или искусственный; диапазон возможных изменений), рассчитаны коэффициенты эластичности для каждого входящего в модель фактора; выполнена систематизация результатов исследований в виде графов, отражающих взаимосвязь между факторами и влияниями молнии.

4. Полученная информация систематизирована в виде контрольных перечней, которые применяются при сборе исходной информации для разработки молниезащиты подстанции, обследования существующей молниезащиты подстанции, расследования аварийных ситуаций, связанных с ударами молнии.

5. Результаты исследований рекомендуются к применению в следующей практической деятельности: при предпроектных обследованиях подстанций для сбора информации о текущем состоянии молниезащиты, разработке задания на проектирование, проектировании молниезащиты подстанции, приемосдаточных испытаниях молниезащиты и ее периодической инспекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криксин, П. В. Исследования характеристик заземлителей молниеотводов / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // 65-я науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов Белорус. нац. техн. ун-та. Минск, 2012.
2. Криксин, П. В. Вторичные влияния молнии. Как она поражает электронику предприятий / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // Энергия и Менеджмент. 2014. № 1. 34–40.
3. Пиковский, А. А. Техничко-экономические расчеты в энергетике в условиях неопределенности / А. А. Пиковский, В. А. Таратин. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 196 с.
4. Криксин, П. В. Оценка электромагнитных влияний на подстанции / П. В. Криксин, М. И. Фурсанов // 65-я науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов Белорус. нац. техн. ун-та. Минск, 2012.
5. Криксин, П. В. Моделирование и анализ процессов, происходящих при стекании тока молнии в грунт / П. В. Криксин // Энергия и Менеджмент. 2012. № 2. С. 14–19.
6. Криксин, П. В. Заземляющее устройство подстанции – основа обеспечения электромагнитной совместимости технических средств: опыт Белорусской энергосистемы / П. В. Криксин, Н. В. Бохан // Энергия и Менеджмент. 2011. № 6. С. 18–20.
7. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339–2011. Введ. 01.12.2011. Минск: Минэнерго, 2011. 593 с.
8. Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзен. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

9. Базелян, Э. М. Физические и инженерные основы молниезащиты / Э. М. Базелян, Б. Н. Горин, В. И. Левитов. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 223 с.
10. IEC 62305-1:2010. Protection Against Lightning. Part 1: General Principles. 137 p.
11. VDB Blitzschutz Montage-Handbuch Online. Verband Deutscher Blitzschutzfirmen [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.vdb.blitzschutz.com. Дата доступа: 02.03.2015.

Поступила 06.01.2016 Подписана в печать 07.03.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Kriksin P. V., Fursanov M. I. (2012) Testing of Earthing Lightning. *65-ia Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspirantov Belarus. Nats. Tekhn. Un-ta* [The 65th Scientific and Technical Conference of Lectures, Reserchers and Graduate Students of Belarusian National Technical University]. Minsk, BNTU (in Russian).
2. Kriksin P. V. (2014) Secondary Effects of Lightning. How it Affects Electronics of Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (1), 34–40 (in Russian).
3. Pikovskiy A. A., Taratin V. A. (1981) *Technical-and-Economical Calculations in the Energy Sector under Uncertainty*. Leningrad, Publisher of the Leningrad State University. 196 (in Russian).
4. Kriksin P. V., Fursanov V. I. (2012) Evaluation of Electromagnetic Effects on the Substation. *65-ia Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspirantov Belarus. Nats. Tekhn. Un-ta* [The 65th Scientific and Technical Conference of Lectures, Reserchers and Graduate Students of Belarusian National Technical University]. Minsk, BNTU (in Russian).
5. Kriksin P. V. (2012) Modeling and Analysis of the Processes Occurring During the Drainage of the Lightning Current into the Ground. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 14–19 (in Russian).
6. Kriksin P. V., Bohan N. V. (2011) Earthing Device of a Substation as the Basis of Electromagnetic Compatibility of Technical Means. The Experience of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (6), 18–20 (in Russian).
7. ТКР 339–2011 (2011). Installations for Voltages up to 750 kV. The air Lines and Electrical Conductors, Switchboards and Transformer Substations, Installations of Electrical Power and a Battery, the Electrical Installation in Residential and Public Buildings. Rules for Electrical Safety and Protective Measures. Accounting for Electricity. Rates of Acceptance Tests. Minsk, Minenergo. 593 (in Russian).
8. Bazaielyan E. M., Raizen Yu. P. (2001) *Lightning and Lightning Protection Physics*. Moscow: Fizmatlit. 320 (in Russian).
9. Bazaielyan E. M., Gorin B. N., Levitov V. I. (1978) *Physical and Engineering Foundations of Lightning Protection*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 223 (in Russian).
10. IEC 62305-1:2010. Protection Against Lightning. Part 1: General Principles. 137.
11. VDB Blitzschutz Montage-Handbuch Online. Verband Deutscher Blitzschutzfirmen. Available at: www.vdb.blitzschutz.com. (Accessed: 2 March 2015).

Received: 06.01.2016

Accepted: 07.03.2016

Published online: 03.06.2016