

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.13: 621.316.98: 621.316.932

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЛИ УДАРОВ МОЛНИЙ В ОПОРЫ И ВЕРХНИЙ ФАЗНЫЙ ПРОВОД В ПРОЛЁТЕ ВЛ БЕЗ МОЛНИЕЗАЩИТНОГО ТРОСА

Д.М. Юдицкий¹, А.Е. Усачев²

¹ООО «НПК «Силеста», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье проводится анализ относительной доли ударов молний в опоры и верхний фазный провод пролёта воздушной линии электропередачи без молниезащитного троса, выполненный в соответствии с различными действующими в Российской Федерации нормативными документами по молниезащите. Показываются существенные различия результатов оценок по разным методикам.

Ключевые слова: молниезащита, удар молнии, зона защиты, доля ударов, ВЛ, обратное перекрытие.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-3-10

COMPARATIVE ESTIMATE OF THE PROPORTION OF LIGHTNING STRIKES IN THE TOWERS AND THE UPPER PHASE WIRE IN THE SPAN OF THE OVERHEAD POWER LINES WITHOUT GROUND WIRE

D.M. Yuditsky¹, A.E. Usachev²

ООО NPK Silesta

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: In the article the analysis of the proportion of lightning strikes in the towers and the upper phase wire of the span of overhead transmission lines without ground wire, made in accordance with different applicable in the Russian Federation, regulatory documents of lightning. Built zone protection of the towers on transmission lines without ground wire depending on the span length and the height of the towers. Seem significant differences of the results of assessments by different techniques. The results of the builds were revealed the need to refine existing methods to determine the fraction of lightning strikes in the towers and phase wirles.

Keywords: lightning protection, lightning strike, area protection, the share of strike, power lines, reverses overlap

Проблема устойчивости воздушных линий электропередачи (ВЛ) высокого напряжения к атмосферным воздействиям остается одной из самых обсуждаемых. Как в Российской Федерации (РФ), так и за рубежом ей посвящено большое количество научных работ, а для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей и нормирования

показателей грозоупорности введен в действие целый ряд как отраслевых, так и федеральных норм и стандартов [2; 6–8; 12; 13].

Ряд нормативных документов, используемых в настоящее время, были выпущены более 15 лет назад, а некоторые и вовсе более 20, а переизданные нормы, как правило, не отличаются в принципиальных подходах к системе молниезащиты от тех, что указаны в более ранних изданиях. Таким образом, регулярно возникают вопросы о необходимости пересмотра и переработки действующих норм [1; 3; 10; 13].

В свою очередь, вопросы технической стороны решения проблемы также не стоят на месте – разрабатываются и внедряются в промышленную эксплуатацию новые и более совершенные устройства [4; 5], развиваются и испытываются существующие меры по снижению числа грозových отключений [9].

Грозоупорность воздушных линий электропередач (ВЛЭП) определяется как число отключений ВЛЭП вследствие их поражения ударами молний в течение года. Число таких отключений пропорционально грозовой активности атмосферы (число ударов молний в 1 квадратный километр поверхности за год) и эквивалентной площади ВЛЭП, под которой понимается площадь земной поверхности, число ударов молний в которую равно числу ударов в ВЛЭП. Эквивалентная площадь ВЛЭП (площадь или зона сбора молний ВЛЭП) зависит от длины линии, степени неравномерности высоты между проводниками ВЛЭП и землей в пролётах между опорами (стрелы провиса провода), числа и высоты опор, наличия или отсутствия молниезащитного троса, расположения траверс и длин подвесных гирлянд изоляторов. Вероятность возникновения однофазного замыкания на землю или межфазного замыкания после удара молнии, а следовательно и вероятность отключения линии устройствами релейной защиты, зависят от класса напряжения ВЛЭП и места удара молнии. В отсутствие молниезащитного троса для ВЛЭП с номинальным напряжением 110 кВ и выше выделяют два таких места ударов молний: в опору и фазный провод. Вероятность отключения ВЛЭП при ударах в опору и фазный провод существенно различается. Для оценки грозоупорности ВЛЭП следует знать соотношение между долей ударов молний в опоры и фазные провода. Для линий без тросовой защиты эти оценки существенно различаются. Так по методике [7] это соотношение принимается равным 0,5, т.е. число ударов в опоры и фазные провода считается равным и не зависит от длины пролёта. Это положение входит в противоречие с другим действующим документом по молниезащите [8], следуя которому опоры можно рассматривать как молниеотвод, а фазные провода в пролёте как объект защиты. В этом случае доля ударов в опоры и фазный провод существенно зависит от длины пролёта. Принятый в 2010 году новый ГОСТ по молниезащите [2] слабо связан с первыми двумя нормативными документами. На его основе можно получить другие соотношения между вероятностью попадания молний в опоры и фазные провода ВЛЭП. В работе приводятся результаты расчётов долей ударов молний в опоры и верхний фазный провод пролёта по комбинированной методике, основанной на сочетании нормативных документов [2] и [8], а также приводится сопоставление с результатами применения методики [7] и метода катящейся сферы, принятого в качестве нормативного в большинстве стран мира.

На рис.1 изображены эквивалентные площади двух опор и верхнего фазного провода, при различных соотношениях между высотами опор и расстоянием между ними, и зоны защиты опор на высоте подвеса фазного провода с вероятностью защиты $P=0,9$ [8]. Эквивалентная площадь опор (зона сбора молний опорой) вычисляется как эквивалентная площадь одиночного молниеотвода и равна площади круга с радиусом, равным тройной высоте опоры [2]:

$$S_1 = 0,5 \cdot \pi \cdot (3 \cdot H_1)^2; \quad S_2 = 0,5 \cdot \pi \cdot (3 \cdot H_2)^2; \quad S_{\text{оп}} = S_1 + S_2, \quad (1)$$

где H_1 и H_2 – высоты левой и правой опор ВЛ; $S_{\text{оп}}$ – общая площадь сбора опор для вычисления числа ударов молнии в опоры. Множитель 0,5 в (1) появляется из-за того, что

на ВЛЭП опора относится к двум пролётам и только половина площади должна учитываться при расчёте ударов в данный пролёт.

Эквивалентная площадь фазного провода пролёта (зона сбора молний на фазный провод) может быть вычислена умножением длины пролёта на ушерённую среднюю высоту подвеса провода (H_{cp}). Хотя высота провода над землёй различна в различных частях пролёта, различия значений эквивалентной площади, полученные при интегрировании по изменяющейся высоте и по средней высоте, не превышают нескольких процентов. С достаточной точностью можно считать, что фазный провод имеет в пролёте одинаковую среднюю высоту [5–8]. Тогда эквивалентная площадь фазного провода в пролёте будет равна:

$$S_{пр} = 6 \cdot H_{cp} \cdot L. \quad (2)$$

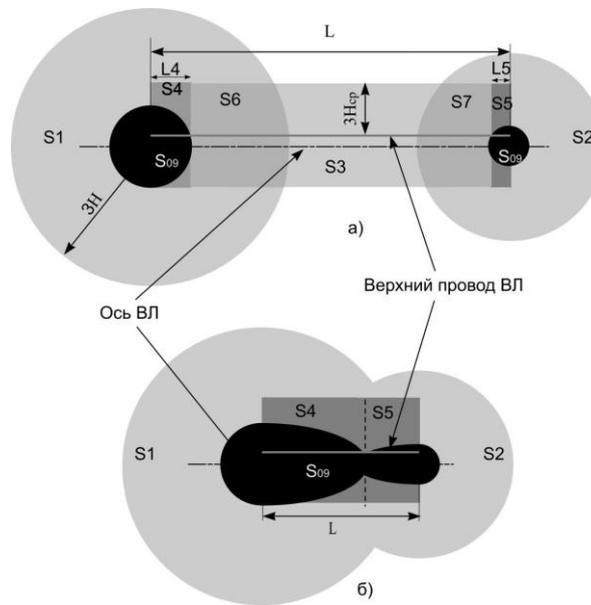


Рис. 1. Области защиты пролёта ВЛ при различных расстояниях (L) между опорами L :
 а) $L > L_{макс}$; б) $L_{макс} < L < L_{мин}$

Как видно на рис. 1, эквивалентные площади опор и фазного провода пересекаются друг с другом, образуя ряд зон. Провод, расположенный между двумя опорами, можно рассматривать как объект защиты молниеотводами [2; 8; 13], которыми можно считать опоры соответствующего пролёта ВЛ. Для пролёта можно использовать формулы расчёта зон парных молниеотводов [8]. Зоны защиты фазного провода с вероятностью защиты 0,9 показаны на рис. 1 чёрным цветом и обозначены символом S_{09} . Участки эквивалентной площади провода длиной L_4 и L_5 , обозначенные символами S_4 и S_5 , соответствуют отрезкам фазового провода, защищённого опорой, с вероятностью защиты $P = 0,9$. С вероятностью $1-P$ молния может поразить фазный провод. Участки S_6 и S_7 одновременно принадлежат как эквивалентным площадям опор S_1 и S_2 , так и зоне провода. В этом случае, в соответствии с ГОСТ [2], общее число ударов молний в опоры и провод, равно произведению среднего числа ударов молний в единицу площади на суммарную площадь $S_6 + S_7$, следует поровну разделить между ударами в опоры и провод, т.е. половины эквивалентной площади этих участков следует относить к опорам, а другую половину к фазному проводу. Площадь S_3 целиком относится к эквивалентной зоне провода. При уменьшении длины пролёта зоны S_3 , S_6 и S_7 уменьшаются и при некоторой длине пролёта в промежутке $L_{макс} < L < L_{мин}$ исчезают

(рис. 1,б). Весь провод оказывается в зоне защиты опор. Чтобы определить число ударов молний в фазный провод в этом случае эквивалентную площадь провода ($S_4 + S_5$) следует умножить на число ударов молний в единицу площади и умножить на $1-P$. Часто при расчётах грозоупорности считают, что грозовая активность атмосферы по всей длине трассы ВЛЭП одинакова и рассчитывать нужно только эквивалентные площади, показанные на рис. 1. Если имеются данные о различии грозовой активности вдоль трассы ВЛЭП, то эти данные можно подставить в расчёт грозоупорности соответствующего пролёта [10]. Сложность расчёта числа ударов молний в опоры пролёта и в фазный провод при учёте реальной длины пролётов на ВЛЭП состоит в том, что внутренний угол защиты, с помощью которого вычисляются площади (зоны) S_3, S_4, S_5, S_6 и S_7 , зависит нелинейно от расстояния между опорами [8]. В расчётах доли ударов в опоры и фазный провод использовались следующие формулы определения эквивалентных площадей опор и провода:

$$S_{\text{оп}} = 0,5 \times (S_1 + S_2) - (S_4 + S_5) \times (1 - P) - 0,5 \times (S_6 + S_7); \quad (3)$$

$$S_{\text{пр}} = S_3 + 0,5 \cdot (S_6 + S_7) + (S_4 + S_5) \cdot (1 - P). \quad (4)$$

Вероятность удара молнии в опоры пролёта при ударе молнии в пролёт (доля ударов в опоры) определится соотношением между соответствующими площадями:

$$P_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{оп}}}{S_{\text{оп}} + S_{\text{пр}}} \frac{1}{2}. \quad (5)$$

В случае рис. 1, б вероятность ударов молнии в опоры, в соответствии с [2; 9], будет равна P для этого и меньшего расстояния между опорами.

При больших расстояниях между опорами, когда минимальная высота защитной зоны парного молниеотвода меньше высоты подвеса провода, не весь провод попадает в зону защиты опор.

При вычислении длины защищённых участков L_4 и L_5 учитывалось, что фазный провод расположен не на оси ВЛ, а смещён от неё на длину верхней траверсы. Проекция защитной зоны опор на горизонтальную плоскость, рассчитываемая как для парного молниеотвода, на высоте расположения фазного провода представляет собой эллипс с полуосями различной длины. Длина перпендикулярной к трассе ВЛ полуоси эллипса рассчитывается по РД [8] как для одиночного молниеотвода. Длина продольной к трассе ВЛ полуоси эллипса рассчитывается [8] как для парного молниеотвода с соответствующим внутренним углом защиты.

Если опоры имеют разную высоту или одна из опор является анкерной, то высота подвеса провода будет зависеть от расстояния между опорами, стрелы провеса провода и разницы высот подвеса провода на опорах пролёта.

Различные варианты соотношения радиусов опор и расстояния между опорами показаны на рис. 2.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: L – длина пролёта ВЛЭП; $R_1 = 3H_1$ и $R_2 = 3H_2$ – радиусы эквивалентных площадей опор; x_1 и x_2 – координаты по оси x точек пересечения границ эквивалентных площадей опор, получаемых по выражению (1), и границы эквивалентной площади ВЛЭП; x_{12} – координата x точек пересечения границ эквивалентных площадей опор. В зависимости от значения координат x_1, x_{12} и x_2 и длины пролёта L возможно семь различных вариантов расчёта площадей рис. 1. Так на рис. 2,а эквивалентные площади левой и правой опор не пересекаются, а часть площади провода ВЛ не входит в зону сбора молний на опоры. Согласно ГОСТ [2] эту часть площади ВЛ можно в расчётах числа ударов принимать с множителем 1. Площади ВЛ, входящие в площадь правой и левой опор, должны учитываться с множителем 0,5. С таким же множителем эти площади должны учитываться при расчёте числа ударов в соответствующую опору.

На рис. 2,б почти вся площадь ВЛ, за исключением небольшой части, входит в зону сбора опор. Появляется участок ВЛ, входящий одновременно в площадь правой и левой

опор. Эта площадка входит одновременно в три зоны сбора и в каждой из них должна учитываться с множителем 1/3.

На рис. 2,а вся площадь ВЛ попадает в зону опор, а зона ВЛ, совпадающая с зонами одновременно двух опор, растёт.

На рис. 2,г и 2,д зона левой опоры заходит на площадь соседнего пролёта.

На рис. 2,е зона правой опоры также захватывает зону предыдущего пролёта, а на рис. 2,б и 2,д вся зона пролёта ВЛ входит в зоны обоих опор и должна учитываться с вероятностью 1/3.

В данном рассмотрении не показаны зоны защиты провода опорами, приведённые на рис. 1.

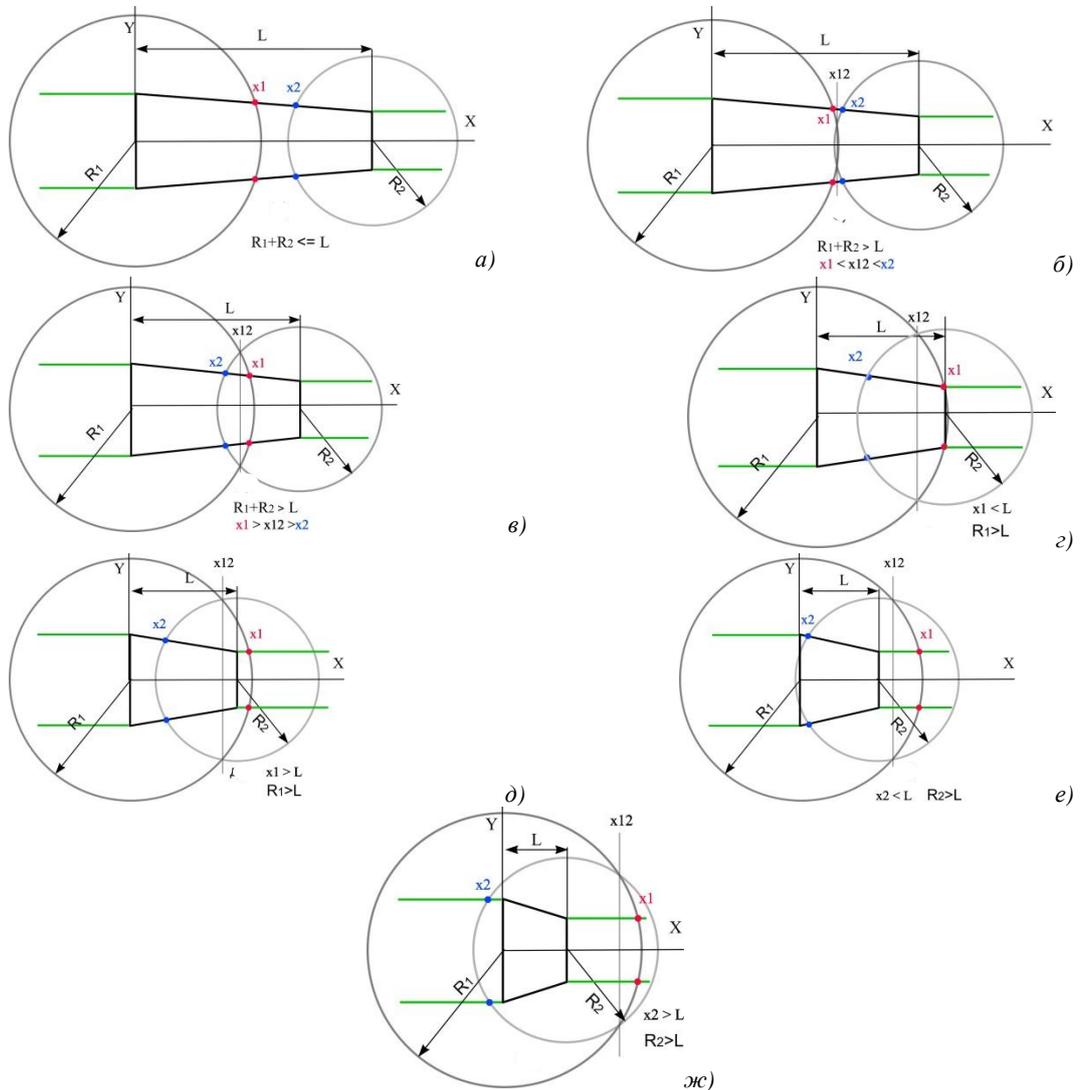


Рис. 2. Эквивалентные площади опор и фазного провода для расчёта числа ударов молний в пролёт ВЛЭП: S опор (круги) и S провод ВЛ (черная трапеция и линии соседних пролётов) при различных расстояниях между опорами

В большинстве случаев на ВЛ реализуются случаи, показанные на рис. 2,а и 2,б. Однако вблизи подстанций реализуются ситуации даже типа рис. 2,ж.

Результаты расчёта доли ударов молний в опоры по вышеописанной методике, основанной на [2; 8], показаны на рис. 3 (кривая 2). Для сравнения на рис. 3 представлены зависимости доли ударов молнии в опоры пролёта от длины пролёта, рассчитанные электро-геометрическим методом [13] (кривая 1) и по РД [7] (прямая 3).

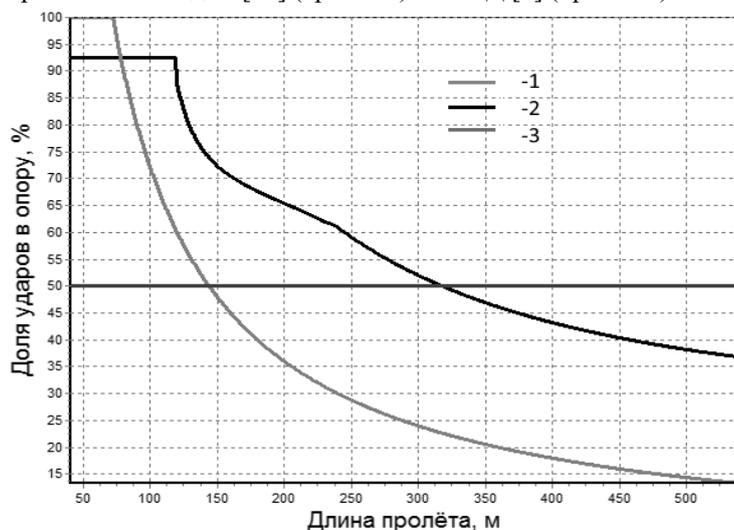


Рис. 3. Доля ударов молнии в опору на ВЛ без троса для опор высотой 40 м, траверсы – 32 м, длине гирлянды изоляторов 2,3 м, длине верхней траверсы 3,5 м:
1 – [10]; 2 – [данная работа], 3 – [7]

В руководстве [7], на основании которого проводятся расчеты грозоупорности ВЛЭП, на линиях без молниезащитного троса рекомендуется принимать долю ударов в опору с коэффициентом 0,5 от общего числа ударов в пролет. Из наших оценок, представленных на рис. 3, следует, что при малых расстояниях между опорами, что характерно для первых пролётов ВЛ от подстанций, оценка доли ударов в опоры существенно больше 0,5. В соответствии с ГОСТ [2] при длинах пролётов меньших 70 м молния в фазный провод вообще не ударяет. Если молния в фазные провода не ударяет, а такой пролёт является анкерным, то зачем на нём ставить молниезащитный трос? Доля ударов в опору по [2] равна 0,5 лишь при длине пролета около 140 м, что часто встречается в середине анкерных пролётов ВЛЭП вдали от подстанций. Во всех остальных случаях применение данного коэффициента приведет к повышению погрешности проводимых расчетов. Все это подтверждает необходимость пересмотра подхода к определению доли ударов молнии в опору пролета ВЛ.

Вывод

Описанный подход к оценке долей ударов молний в опоры и фазные провода на ВЛЭП 110, 220 кВ без молниезащитного троса свидетельствует о необходимости пересмотра существующих концепций и уточнения доли ударов в опоры пролёта при разных расстояниях между опорами. Всё это позволит снизить погрешность проводимых расчетов, что поможет в оценке грозоупорности ВЛ 110, 220 кВ.

Литература

1. Базелян Э.М. Проблемы нормирования молниезащиты в России // V Международная конференция по молниезащите. СПб, 2016.
2. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы. Введ. 2011-12-01. М.: Стандартинформ. 2011.
3. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Репкина О.Д. Рекомендации по защите оборудования подстанций от набегающих волн грозового присхождения с использованием ОПН // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 87–97.
4. Золотых А.Г., Енькин Е.Ю., Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. Применение полимерных изоляторов-разрядников для молниезащиты воздушных линий электропередачи и повышения надежности работы оборудования подстанций 35 и 110 кВ // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 330–334..
5. Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. Молниезащита ВЛ на основе мультикамерных разрядников нового поколения // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014.
6. ПУЭ Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. Разд. 2. Введ. 2003-01-01. Утв. Минэнерго России. М.: Изд.НЦ ЭНАС, 2002.
7. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кв от грозовых и внутренних перенапряжений. Утв. РАО «ЕЭС России» 12.07.1999. М.: Издательство ПЭИПК, 1999.
8. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Утв. Минэнерго России 30.06.2003. ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.
9. Туманов О.В., Репкина М.Б. Совершенствование систем заземления опор ВЛ с целью повышения грозоупорности ВЛ и ПС // IV Международная конференция по молниезащите. СПб, 2014. С. 155–163.
10. Усачев А.Е., Юдицкий Д.М. Методика расчёта грозоупорности воздушных линий электропередачи по параметрам опор и пролётов с учётом ветровой нагрузки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 70–76.
11. Усачев А.Е., Юдицкий Д.М. Новая концепция защиты подстанций от волн грозовых перенапряжений // Известия высших учебных заведений: Проблемы энергетики. 2014. № 11–12. С. 94–100.
12. Rizk F.A.M. and F. Vidal, IEEE Trans. Power Deliv., 23(1), 296, 2008.
13. Cooray V., Nucci C.A., Rachidi F. On the Possible Variation of the Lightning Striking Distance as Defined in the IEC Lightning Protection Standard as a Function of Structure Height. Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria. 2012.

Авторы публикации

Юдицкий Данил Михайлович – руководитель проектно-исследовательского центра ООО «НПК «Силеста». E-mail: yuditskiydm@mail.ru.

Усачёв Александр Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС) «Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

References

1. Bazelyan, E. M. problems of standardization of lightning protection in Russia // the V international conference on lightning protection. SPb.: 2016.
2. GOST R IEC 62305-1-2010 "Management of risk. Lightning protection. General principles" dated November 30, 2010 No. 795-St // STANDARTINFORM. 2010.

3. Gumerova N. I., Efimov B. V., Repkina O. D. Recommendations on the protection equipment of substations from oncoming waves of storm origin using surge arresters // IV international conference on lightning protection. SPb.: 2014. P. 87–97.

4. Golden A. G., Anikin E. J., Podporkin G. V., Sivaev A. D. the Use of polymeric insulators-arresters for lightning protection of overhead power lines and improve reliability of substation equipment 35 kV and 110 kV // IV international conference on lightning protection. SPb.: 2014. Pp. 330–334..

5. Podporkin G. V., Anikin E. Y., sawyers V. E. Lightning protection overhead power lines based on multi-chamber arresters new generation // IV international conference on lightning protection. SPb: 2014.

6. Regulations for Electrical Installation. 7th Edition.

7. GD 153-34.3-35.125-99 "Guide for the protection of electrical networks 6-1150 kV against lightning and internal overvoltages", dated July 12, 1999 Publisher PEIPK. 1999

8. SO 153-34.21.122-2003. "Instructions for installation of lightning protection of buildings, constructions and industrial communications", dated 30 June 2003 No. 280 // tisc ORGRES. 2004

9. Tumanov, O. V., Repkina M. B. Improvement of grounding of supports of overhead lines to increase grotophorst PL and substation // IV international conference on lightning protection. SPb: 2014. P. 155–163.

10. Usachev A. E., D. M. Yuditskii Method of calculating grotophorst of overhead power lines in the parameters of the supports and spans taking into account wind loads // proceedings of higher educational establishments: Problems of energy. 2014. № 7–8. P. 70–76.

11. Usachev A. E., D. M. Yuditskii, a New concept for the protection of substations from lightning surges waves // proceedings of higher educational establishments: Problems of energy. 2014. № 11–12. P. 94–100.

12. Rizk, F.A.M. and F. Vidal, IEEE Trans. Power Deliv., 23 (1), 296, 2008.

13. V. Cooray, C. A. Nucci, F. Rachidi. On the Possible Variation of the Lightning Striking Distance as Defined in the IEC Lightning Protection Standard as a Function of Structure Height. Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.

Authors of the publication

Judickij Danil Mihajlovich. – Research and production company Silesta Ltd. E-mail: yuditskiydm@mail.ru.

Usachev Aleksandr Evgen'evich. – State Educational Institution "Kazan State Power Engineering University", chair «Power Stations», Professor, Doctor of Physics and Mathematics. E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

Поступила в редакцию

09 октября 2017 года.