

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Развитие методов и алгоритмов расчета элементов защиты объектов энергетики всегда остается одной из важных научно-технических проблем. Актуальным остается как разработка новых технических решений, так и совершенствование нормативно-правовой базы. Указанные тенденции справедливы и для молниезащиты электрических станций и подстанций. Целью данного исследования является обзор существующих методик определения параметров и элементов молниезащиты на примере расчета типовой подстанции. В результате проведенного исследования рассмотрены методики проектирования и определения эффективности молниезащиты электрических станций и подстанций. Представлены результаты расчета молниезащиты открытого распределительного устройства трансформаторной подстанции 110/10 кВ. Результаты исследования могут применяться для разработки алгоритмов определения параметров молниезащиты, а также программного обеспечения для автоматизированного расчета защиты открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций от прямых ударов молнии.

**Ключевые слова:** зона защиты молниеотвода, методики расчета молниезащиты, расчет молниезащиты распределительного устройства.

Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) на объектах электроэнергетики остаются достаточно сложными, несмотря на существование различного рода мероприятий по ее обеспечению. Актуальными остаются проблемы распространения полевых и кондуктивных помех, что влияет на электромагнитную обстановку в целом. Принимая во внимание многогранность проблемы по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики, можно выразить некие общие технические подходы и рекомендации. При этом грамотное проектирование непосредственно самого объекта является базисом при решении указанной проблемы. На этапе проектирования должны определяться вопросы выбора принципиальной схемы объекта и его конструктивных особенностей; также необходимо принимать во внимание обеспечение безопасности, регулирование параметров и многое другое. ЭМС и электромагнитная обстановка на электрических станциях и подстанциях в основном зависит от таких обстоятельств, как исполнение строительных конструкций, системы молниезащиты и заземления, первичных и вторичных схем и т.д. И применение в настоящее время дорогостоящего современного оборудования выводит вопросы построения молниезащиты и заземления станций и подстанций на первый план [1]. При этом указанная проблема актуальна не только в России,

но и за рубежом [2]. Анализ публикаций [3, 4] также показывает, что остро стоит проблема нормативно-правовой документации в данной области исследований.

Главной рекомендацией при проектировании электрических станций и подстанций является использование зонной концепции ограничения перенапряжений. Данная концепция была разработана ещё в 70-е годы для защиты зданий от электромагнитного воздействия атмосферных зарядов, коммутаций в энергетических сетях и ядерных взрывов, которые сопровождаются выделением большого количества энергии. Со временем зонная концепция приобрела широкое применение при обеспечении электромагнитной совместимости [5]. В соответствии с данной концепцией в строительной части выделяются зоны, в которых обычно происходят различные электромагнитные воздействия (рис. 1). К примеру, этими зонами могут быть наружное окружение здания, отдельное помещение, само здание, шкафы управления, различные приборы и многое другое.

Для наиболее успешного использования зонной концепции необходимо применять соответствующую методику [1, 6, 7].

Далее рассмотрим способы защит открытых распределительных устройств (ОРУ) при помощи молниеотводов, а также по одной из методик опре-

деления зон защиты стержневыми молниеотводами рассчитаем защиту подстанции 110/10 кВ от прямых ударов молнии.

Стержневые молниеотводы являются, как правило, основными элементами молниезащиты распределительных устройств электростанций и подстанций различных классов напряжений [8]. Сам молниеотвод — это устройство, высота которого много больше высоты защищаемого объекта и через которое ток молнии отводится в землю, обходя защищаемый объект. Наибольшее распространение получили два способа защиты электрических станций и подстанций:

- 1) расположение стержневых молниеотводов на самих конструкциях и присоединение их к общему заземляющему устройству всей подстанции;
- 2) применение отдельно стоящего молниеотвода с независимым контуром заземления.

При определении наиболее выгодного исполнения элементов молниезащиты необходимо делать технико-экономическое обоснование, а также уделяется внимание возможному ущербу на объектах от ударов молнии. Основываясь на приведённых фактах сравнения, наиболее предпочтительнее оказывается, как правило, первый способ защиты, а второй способ рекомендуется применять в случаях, когда первый способ не в полной мере обеспечивает достаточную грозоупорность [6].

Из теоретических исследований в области техники высоких напряжений известно, что молния поражает, как правило, наиболее высокие металлоконструкции, это, в свою очередь, лежит в основе защитного эффекта применяемых молниеотводов. Поэтому существует такое понятие, как защитная зона молниеотвода, она представляет собой площадь, в которой здания и сооружения надёжно защищены от прямых ударов молнии с высокой вероятностью.

В различных источниках рассматривается несколько методов расчета элементов защиты электрических станций и подстанций от ударов молнии [1, 7–9].

**Первая методика** — методика, разработанная профессором А. А. Акопяном, подтверждается большим количеством лабораторных исследований на моделях, проводившихся в 1936–1940 гг. В соответствии с данной методикой зоны защиты стержневых молниеотводов высотой до 60 метров представляют собой «шатёр» (рис. 2). Объекты, находящиеся в зоне ( $h_x$ ), защищены от ударов молний с вероятностью  $P \approx 0,999$ .

Позднее указанную методику стали использовать для расчетов и для более высоких молниеотводов. У таких молниеотводов зона защиты представляет собой «усеченный шатёр» в связи с тем, что удар молнии редко попадает в вершину самого молниеотвода. Помимо прочего, применение методики Акопяна представляет значительное удобство в расчетах, потому что по высоте защищаемого объекта  $h_x$  можно определить сразу высоты 3–4 ближайших молниеотводов. Данная методика входит в соответствующие нормативно-технические документы [9].

**Вторая методика** была предложена в 60-е годы Энергетическим институтом имени Г. М. Кржижановского, является упрощённой методикой построения зон защиты одиночного стержневого молниеотвода, в данной методике, в отличие от первой, шатёр заменен отрезками двух прямых, именно поэтому она является удобной для построения зон

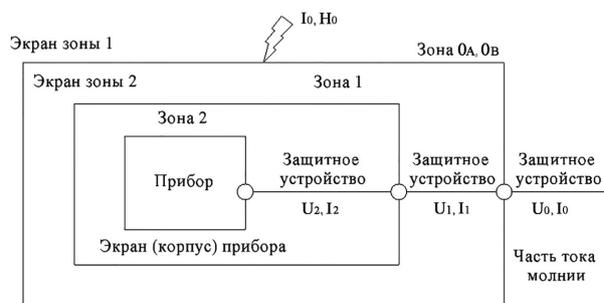


Рис. 1. Электромагнитная обстановка в защитных зонах при грозовом разряде

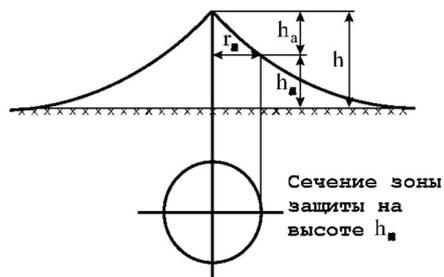


Рис. 2. Зона защиты одиночного молниеотвода по методике Акопяна

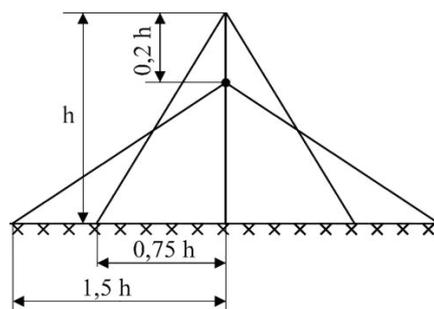


Рис. 3. Упрощенная методика построения зоны защиты одиночного молниеотвода

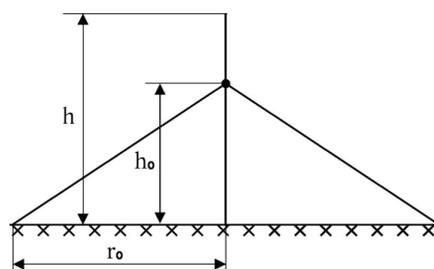


Рис. 4. Зона защиты одиночного молниеотвода по третьей методике

защиты двух молниеотводов (рис. 3). Расчет по данной методике идентичен первой. Надёжность защиты для установок электроэнергетики принимается  $P \approx 0,99$ . Подробно данная методика изложена в электротехническом справочнике [10].

**Третья методика** определяет зону защиты отдельно стоящего молниеотвода, как конус (рис. 4). На рисунке высота конуса меньше высоты молниеотвода  $h_0 < h$ . Это связано с тем, что вершины молниеотводов всё равно являются незащищён-

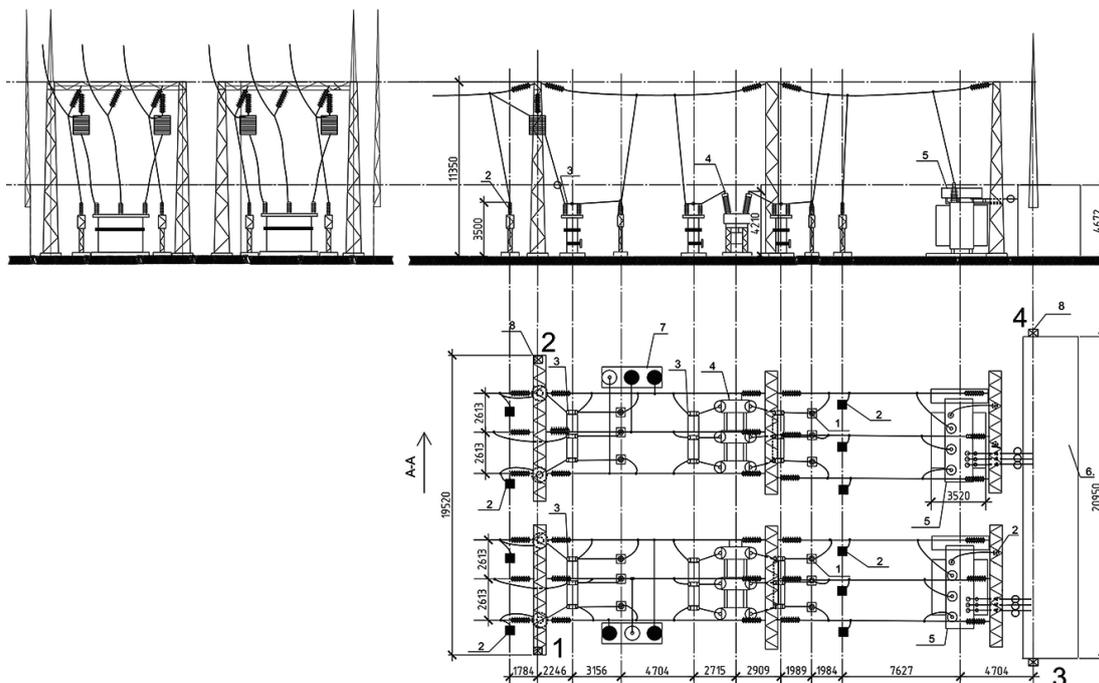


Рис. 5. Планировка ОРУ ПС 110/10 кВ



Рис. 6. Расположение молниеотводов

ними. Данная методика также представлена в соответствующих нормативно-технических документах [11].

При учёте ущерба от удара молнии устройство молниезащиты, как правило, имеет I–III категорию и защита выполняется зоной А ( $P \approx 0,995$ ) или Б ( $P \approx 0,95$ ).

Приведем пример расчёта молниезащиты подстанции 110/10 кВ. На первом этапе воспользуемся методикой Акопяна. После, для проверки, произведём расчёт по третьей методике. Также необходимо отметить, что в настоящее время существуют различного рода алгоритмы и программные комплексы для расчётов молниезащиты объектов энергетики [12–15].

Исходные данные для расчёта (примем типовые размеры объекта):

- высота портала — 11,35 м;
- высота закрытого распределительного устройства (ЗРУ) — 4,672 м;
- габариты ОРУ ПС 110 кВ (ДхШ) — 36,734×20,95 м;
- сопротивление заземляющего устройства подстанции — 0,5 Ом;

Планировка ПС 110/10 кВ изображена на рис. 5.

1. Определяем возможность установки молниеотводов на конструкциях ОРУ 110 кВ.

В соответствии с требованиями ПУЭ п.4.2.133-4.2.142 «Защита от грозовых перенапряжений» молниеотводы разрешается устанавливать на пор-

талах (кроме трансформаторного портала), а также на здании ЗРУ, но при этом защита ЗРУ, имеющих металлические покрытия кровли или железобетонные несущие конструкции, следует выполнять заземлением этих конструкций [4].

Устанавливаем молниеотводы на порталах, а также на ЗРУ. Для наиболее эффективной реализации зон защиты указанных объектов молниеотводы необходимо расположить, как показано на рис. 6 [8]. После расположения молниеотводов рассчитываем треугольник (1–2–3). Через три указанных молниеотвода проводится окружность, вычисляется ее диаметр

$$D = 37,566 \text{ м.}$$

Определяем активную зону молниеотвод  $h_a$

$$h_a \geq \frac{D}{8} = \frac{37,566}{8} = 4,696 \text{ м.}$$

Принимаем  $h_a = 4,71$  м.

Рассчитываем высоту молниеотводов  $h$

$$h = h_a + h_x = 4,71 + 11,350 = 16,06 \text{ м,}$$

где  $h_x$  — высота самого высокого сооружения в выбранном треугольнике.

В нашем случае это портал высотой  $h_x = 11,35$  м.

Определяем радиус зоны защиты стержневого молниеотвода на высоте  $h_x$ , для молниеотводов высотой до 60 м определяется по формуле [8]

$$r_x = \frac{1,6 \cdot h \cdot h_a \cdot p}{h + h_a} = \frac{1,6 \cdot 16,06 \cdot 4,71}{16,06 + 4,71} = 4,415 \text{ м,}$$

где  $p$  — коэффициент для разных высот молниеотводов ( $p = 1$  для  $h \leq 30$  м и  $p = 5,5/\sqrt{h}$  для  $60 > h > 30$  м).

Граница зоны защиты между молниеотводами 1 и 2 — это окружность радиусом  $R = 18,686$  м (рис. 7). Она проходит через вершины молниеотводов, а также через точку А, которая расположена на высоте  $h_0$

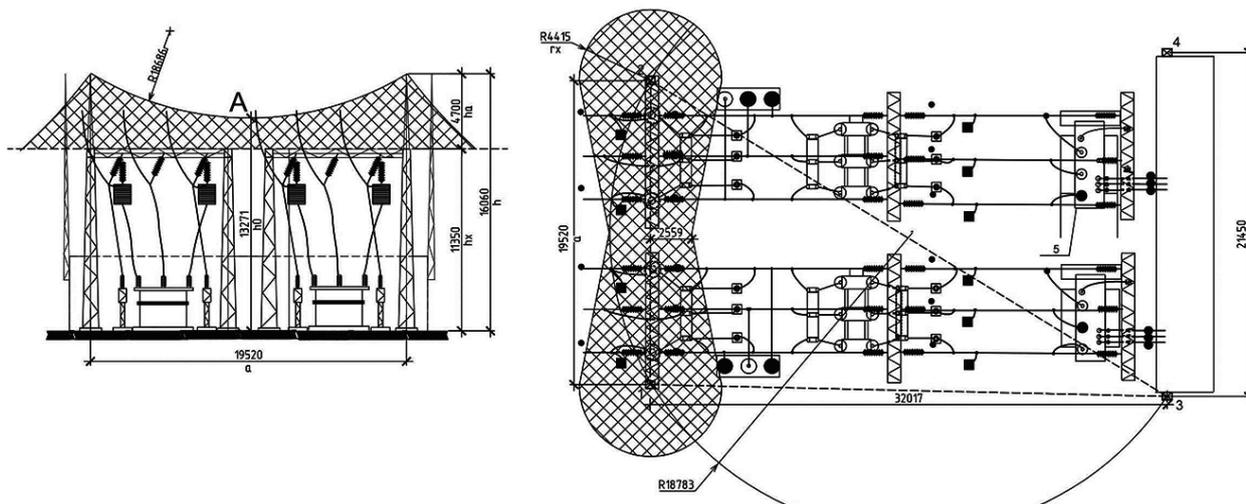
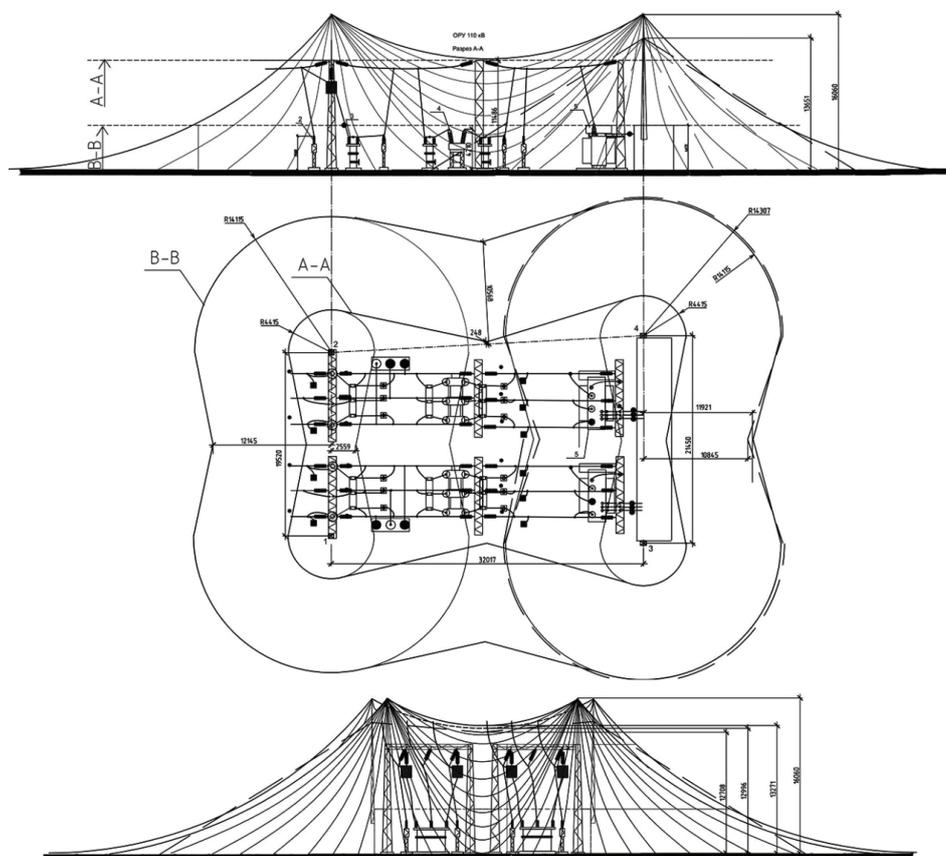
Рис. 7. Зона защиты молниеотводов 1 и 2 на высоте порталов  $h_x=11,35$  м

Рис. 8. Зона защиты ПС 110/10кВ

$$h_0 = h - \frac{a}{7 \cdot p} = 16,06 - \frac{19,52}{7 \cdot 1} = 13,271.$$

В середине между двумя молниеотводами получается зона защиты с наименьшей шириной  $b_x$  на высоте от земли  $h_x$  (рис. 7). Ее можно определить по графикам [8] или по следующему выражению:

$$b_x = 2 \cdot r_x \cdot \frac{7 \cdot h_a - a}{14 \cdot h_a - a} = 2 \cdot 4,415 \cdot \frac{7 \cdot 4,71 - 19,52}{14 \cdot 4,71 - 19,52} = 2,559 \text{ м.}$$

Для наглядности на рис. 7 построена зона защиты на высоте порталов для пары молниеотводов 1 и 2. Все здания и сооружения, попавшие в треугольник, оказываются защищены.

Аналогично произведем расчёт для следующих пар молниеотводов. Как видно на рис. 8, за пределы треугольника 2–3–4 попадает ЗРУ, в этом случае необходимо для молниеотводов 3 и 4 построить сечение зоны защиты на высоте ЗРУ и проверить, попало ли оно целиком в зону защиты. В нашем случае ЗРУ попадает в зону защиты. В случае непопадания закрытого распределительного устройства подстанции в зону защиты, то увеличивают высоты 3 и 4 молниеотводов. В результате расчет

Результаты расчётов зон защиты

Пара проверяемых молниеотводов	Параметр							
	$a$ , м	$h_x$ , м	$D$ , м	$h_a$ , м	$h$ , м	$r_x$ , м	$b_x$ , м	$h_0$ , м
	Проверка по I методике на высоте порталов $h_x = 11,35$ м							
1,2	19,52	11,35	37,566	4,71	16,06	4,415	2,559	13,271
3,4	21,45	11,35	37,634	4,71	16,06	4,415	2,287	12,996
1,3	32,017	11,35	38,124	4,71	16,06	4,415	0,248	11,486
2,4	32,017	11,35	38,234	4,71	16,06	4,415	0,248	11,486
Проверка по III методике на высоте ЗРУ $h_x = 11,35$ м								
1,2	19,52	4,672	37,566	11,388	16,06	14,115	12,145	13,271
3,4	21,45	4,672	37,634	11,388	16,06	14,115	11,921	12,996
1,3	32,017	4,672	38,124	11,388	16,06	14,115	10,568	11,486
2,4	32,017	4,672	38,234	11,388	16,06	14,115	10,568	11,486

молниезащиты ЗРУ выполняют как по первой, так и по третьей методике.

Таким образом, далее необходимо провести проверочный расчет зон защиты ЗРУ по третьей методике.

Зона защиты одиночного молниеотвода с надежностью  $P \approx 0,995$  имеет следующие размеры:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 16,06 = 13,651 \text{ м};$$

$$r_x = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left( \frac{h - h_x}{0,85} \right) =$$

$$= (1,1 - 0,002 \cdot 16,06) \cdot \left( \frac{16,06 - 4,672}{0,85} \right) = 14,307 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot h =$$

$$= (1,1 - 0,002 \cdot 16,06) \cdot 16,065 = 17,150 \text{ м};$$

$$h_c = h_0 - (0,17 + 0,0003 \cdot h) \cdot (a - h) = 13,651 -$$

$$- (0,17 + 0,0003 \cdot 16,06) \cdot (21,45 - 16,06) = 12,708 \text{ м};$$

$$b_x = r_0 \left( \frac{h_c - h_x}{h_c} \right) = 17,150 \left( \frac{12,708 - 4,672}{12,708} \right) = 10,845 \text{ м}.$$

Результаты остальных расчетов приведены в табл. 1.

Далее произведём построение зон защиты ПС 110/10 кВ (рис. 8).

Помимо прочего, необходимо соблюсти следующие дополнительные меры:

1) растекание тока молнии по магистралям заземления не должно быть менее чем в двух–трех направлениях [8];

2) должны быть установлены один или два вертикальных электрода ( $l = 3...5$  м) на расстоянии не менее длины электрода от стойки, на которой установлен молниеотвод [8].

Кроме того, молниеотводы необходимо присоединить к заземляющему устройству подстанции, чтобы обеспечить требования ПУЭ по величине сопротивления контура заземления [8].

В результате проведенного исследования рассмотрены методики проектирования и определения эффективности молниезащиты электрических станций и подстанций.

Представлены результаты расчёта молниезащиты открытого распределительного устройства трансформаторной подстанции 110/10 кВ, которые показывают, что открытое распределительное устройство подстанции 110/10 кВ полностью защищено от прямых ударов молнией с вероятностью  $P \approx 0,999$ .

Результаты проверочного расчета защиты здания ЗРУ показывают вероятность защиты  $P \approx 0,995$ .

Результаты исследования могут применяться для разработки алгоритмов определения параметров молниезащиты, а также программного обеспечения для автоматизированного расчёта защиты открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций от прямых ударов молнии.

#### Библиографический список

1. Куприенко В. М. Анализ методик расчета и выбора параметров зоны защиты стержневых молниеотводов // Электротехника. 2012. № 9. С. 39–43.
2. Rakov V., Rachidi F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection // IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51 (3). P. 428–442.
3. Сухачев И. С., Чепур П. В. Общие вопросы и проблемы нормативной документации по молниезащите и заземлению на объектах топливно-энергетического комплекса // Фундаментальные исследования. 2016. № 3. С. 301–304.
4. Шишигин С. А. Предложения по совершенствованию стандартов молниезащиты, заземления, ЭМС // Энергетик. 2017. № 2. С. 31–32.

5. Инструкция по устройству сетей заземления и молниезащите // ВНИИ Проектэлектромонтаж. Концерн «Электромонтаж». М.: Изд-во Кенди, 1992. 63 с.
6. Дьяков А. Ф., Максимов Б. К., Борисов Р. К. [и др.]. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / под ред. А. Ф. Дьякова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издат. дом МЭИ, 2011. 544 с.
7. РД 153-34.0-20.525–00. Методические указания по контролю составления заземляющих устройств электроустановок. М.: ОРГРЭС, 2000. 64 с.
8. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2002. 220 с.
9. РД 34.21.121. Руководящие указания по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1974. 19 с.
10. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. 8-е изд. М.: Издат. дом МЭИ, 2002. 964 с.
11. Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах / Под общ. ред. В. П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
12. Шкаруба М. В. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
13. Шишигин С. А. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16–23.
14. Шишигин С. А., Мещеряков В. Е., Шишигин Д. С. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда // Электричество. 2015. № 8. С. 4–9.
15. Сухачев И. С., Чепур П. В. Разработка программного алгоритма эффективной молниезащиты // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 291–295.

**ЛЮТАРЕВИЧ Александр Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». SPIN-код: 7525-1609  
AuthorID (РИНЦ): 174437  
AuthorID (SCOPUS): 57188871750  
ResearcherID: D-9400-2014  
Адрес для переписки: l.alexander@inbox.ru  
**БАСМАНОВСКИЙ Максим Андреевич**, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.  
Адрес для переписки: maks190596@mail.ru  
**СЕРЖАНСКИЙ Виктор Павлович**, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.  
Адрес для переписки: viktorserszh96@mail.ru  
**ЖИЛЕНКО Елена Петровна**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Адрес для переписки: l.alexander@inbox.ru

#### Для цитирования

Лютаревич А. Г., Басмановский М. А., Сержанский В. П., Жиленко Е. П. Исследование молниезащиты открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 61–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-61-66.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© А. Г. Лютаревич, М. А. Басмановский, В. П. Сержанский, Е. П. Жиленко