



DOI 10.5862/JEST/5

УДК 699.887.2

*Ф.Х. Халилов, Э.Р. Котляров*

## **ОТКАЗ ОТ ТРОСОВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ И ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 35–150 КВ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

*F.Kh.Khalilov, Ed.R. Kotlyarov*

### **AVOIDING THE USE OF PROTECTION WIRE AND TUBULAR RODS OF 35-150 KV FOR LIGHTNING PROTECTION OF OVERHEAD POWER LINES AND SUBSTATIONS IN CONDITIONS OF FAR NORTH**

Статья посвящена проблеме молниезащиты воздушных линий (ВЛ) и подстанций (ПС) 35–150 кВ, находящихся в районах Крайнего Севера Российской Федерации. В статье говорится, что не все решения ПУЭ отвечают требованиям, предъявляемым к надежности молниезащиты ВЛ и ПС. Их молниезащиту в районах Крайнего Севера можно организовать и без молниезащитных тросов и трубчатых разрядников, рекомендуемых ПУЭ. Предлагаются: альтернативные способы молниезащиты: установка на ВЛ подвесных нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и ОПН последнего поколения на подстанциях; каскадная схема молниезащиты; полимерные изоляторы-разрядники. Кроме того, показано, что недоиспользуются коммутационные ресурсы выключателей, которые являются резервом по улучшению молниезащиты.

**МОЛНИЕЗАЩИТА; КРАЙНИЙ СЕВЕР; НАДЕЖНОСТЬ; ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ; ПОДСТАНЦИИ.**

This work considers the problem of lightning protection of 35-150 kV overhead power lines and substations in conditions of the Far North of the Russian Federation. The alternative methods of organizing lightning protection are described in this paper, since conclusions, suggested by the Electrical Installation Code, are not able to provide the required level of lightning protection. Recent research shows that the lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of the Far North can be arranged without protection wire and tubular rods, which is recommended by EIC. As an alternative the authors offer the following measures to improve the level of protection for these overhead power lines and substations: equipping the overhead power lines with suspended surge protector devices (SPD), launching the last generation SPD at substations, the cascade scheme of lightning protection, using smart polymer arresters. In addition, it's mentioned that the switching resource of the HV circuit breaker is not fully utilized, whereas it's a reserve to improve lightning protection.

**LIGHTNING PROTECTION; ELECTRICAL INSTALLATION CODE; OVERHEAD POWER LINES; SURGE PROTECTOR DEVICES; SMART ARRESTERS.**

#### **Введение**

Традиционные мероприятия по молниезащите воздушных линий (ВЛ) 35–150 кВ по ПУЭ [1] предусматривают следующие мероприятия:

1) сооружение многокилометровых молниезащитных тросов с углами защиты не более 25–35°;

2) обеспечение необходимой импульсной электрической прочности линейной изоляции;

3) обеспечение импульсного сопротивления опор не более  $R_{3и} = 10–20$  Ом в районах с удельным сопротивлением грунтов  $\rho_r$  не более 500 Ом·м и  $R_{зр} = (10–20)\sqrt{\rho_r / 500}$  — в районах с  $\rho_r$  более 500 Ом·м.

4) применение автоматического повторного включения (АПВ).

Кроме того, для обеспечения приемлемой величины показателя надежности подстанций по концам ВЛ устанавливают трубчатые разрядники (РТ).

Однако перечисленные молниезащитные мероприятия (особенно при невыполнении требования п. 3) не дают возможность обеспечить высокий показатель надежности молниезащиты ВЛ и подстанций 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера РФ, где  $\rho_r$  достигает величин более 15–20 кОм·м.

**Цели данной работы:**

выделить особенности молниезащиты подстанций в районах Крайнего Севера;

рассмотреть способы нетрадиционной молниезащиты подстанций в районах Крайнего Севера, которые могли бы обеспечить соответствующий уровень надежности.

При расчетах показателя молниезащиты ВЛ и ПС в условиях Крайнего Севера не учитывается ряд обстоятельств:

1. ПУЭ не четко устанавливает слабую грозовую деятельность. Например, при расчетах число грозовых часов в Ленинградской области принимается равным  $T_q = 30–50$  часов, а в Мурманской области оно равно  $T_q = 5–10$  часов.

2. В условиях Крайнего Севера, как отмечено,  $\rho_r > (15–20)$  кОм·м, поэтому импульсное сопротивление опор доходит до сотен Ом, а подстанций — до нескольких Ом. По этой причине для снижения сопротивления контура заземления подстанции применяют «выносные заземлители» через длинные шлейфы, в удаленном конце которых имеются «местные» контуры заземления, находящиеся в болотах, реках, морской воде и т. д. [2–4].

3. В упомянутых районах сооружение молниезащитных тросов на ВЛ 35–150 кВ приводит больше к негативным последствиям, чем к позитивным. Требование ПУЭ к углам защиты молниезащитных тросов ( $\alpha \leq 25–35^\circ$ ), действительно, в значительной мере снижают вероятность прорывов молнии на фазные провода. Вместе с тем наличие молниезащитных тросов приводит к значительному росту вероятности обратных перекрытий как при прямых ударах молнии на тросы, так и при ударах ее в опоры. Это связано с большой величиной импульсного

сопротивления заземления опор. Кроме того, молниезащитные тросы при гололеде могут оборваться и упасть; ликвидация последствий в этом случае потребует привлечения технических и организационных резервов.

4. Молниезащитные тросы обычно рассчитываются с учетом воздействия на них полевых загрязнений и атмосферы; их гарантированный срок эксплуатации без повреждения равен 25–30 лет. Однако в районах с агрессивной атмосферой, например вблизи металлургических заводов и комбинатов, цементных заводов, шахт по добыче угля и железной руды и т. п., тросы подвергаются электрохимической коррозии, и в среднем они без повреждений работают 5–10 лет. Поэтому в таких районах тросы требуют периодической замены, что ведет к определенным капитальным затратам и эксплуатационным неудобствам. По этой причине во многих случаях ВЛ строят без молниезащитных тросов.

5. ВЛ 35–150 кВ в настоящее время являются элементами распределительных сетей, поэтому их длина значительно меньше 20 км. Так, например, из 54 обследованных ВЛ 35 кВ Кольского филиала МРСК Северо-Запада только 7 ВЛ имеют длину более 20 км. В сетях 110 кВ из 67 ВЛ только у 11 протяженность больше 20 км, а в сетях 150 кВ — у 14 из 39 обследованных ВЛ. Таким образом, можно утверждать, что вероятность прямых ударов молнии на таких ВЛ мала и поэтому отказ от молниезащитных тросов возможен.

При малых длинах ВЛ доля тросовых участков на подходах к концевым устройствам — подстанциям — составляет 30 % и более. При этом, если позволяет молниезащита подстанций, то можно вообще отказаться от молниезащитных тросов.

6. При организации молниезащиты ВЛ 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера не учитывается коммутационный ресурс выключателей. Во-первых, ВЛ имеют самовосстанавливающуюся изоляцию. Поэтому после молниевых перекрытия изоляции ВЛ за время бестоковой паузы АПВ она восстанавливается, и ВЛ включается в нормальную работу. Во-вторых, между двумя капремонтами выключателей допускается несколько отключений ( $n_0$ ) полного тока КЗ ( $I_0$  — ток КЗ на шинах). Что же касается отключений при перекрытиях вдали от подстанций, разуме-

ется, фактический ток КЗ —  $I_{КЗф}$  — будет меньше, чем  $I_0$ , т. е. выключатель может фактически отключить ток  $I_{КЗф} n_{ф}$  раз ( $n_{ф} > n_0$ ). Это обстоятельство должно быть учтено при организации молниезащиты ВЛ.

7. На многих ВЛ 35–150 кВ Крайнего Севера установлены морально и технически устаревшие защитные аппараты — трубчатые разрядники (РТ). Эксплуатация этих защитных аппаратов связана с большими расходами и неудобствами, а именно:

после каждого грозового сезона РТ следует демонтировать для обследования в лабораторных условиях и нанести лак на трубку, после чего снова подключить к ВЛ;

после нескольких срабатываний внутренний диаметр трубки из винилпласта или фибробакелита РТ увеличивается, вследствие чего изменяется верхняя и нижняя величины тока срабатывания. Поэтому приходится переносить РТ на другие линии или вовсе утилизировать.

По перечисленным причинам эксплуатационный персонал прибегает к некоторым нетрадиционным способам молниезащиты ВЛ, которые приводят к пересмотру молниезащиты подстанций.

Возможными областями применения нетрадиционной молниезащиты ВЛ 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера, например в Мурманской области, могут быть:

высокие переходные пролеты через реки, заливы, ущелья и другие преграды по трассе ВЛ;

участки ВЛ в гололедоопасных районах, где применение молниезащитных тросов нецелесообразно;

участки ВЛ с локально повышенной молниепоражаемостью;

двухцепные ВЛ с вертикальной подвеской проводов;

в некоторых районах со сверхвысоким значением удельного объемного сопротивления грунтов.

Главный нетрадиционный способ молниезащиты ВЛ — это применение нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН). Максимальный эффект может быть обеспечен путем установки ОПН на каждой опоре и на каждой фазе ВЛ. Однако из-за достаточно высокой стоимости названных защитных аппаратов такой способ экономически нецелесообразен.

Ряд технико-экономических преимуществ могут дать длинноискровые разрядники (РДИ), которые в определенных случаях позволяют отказать от молниезащитных тросов и РТ, обеспечивая при этом требуемую величину показателя молниезащиты ВЛ. Это достигается за счет значительного снижения вероятности перехода импульсного перекрытия изоляции в устойчивую дугу тока короткого замыкания. Однако эти защитные аппараты преимущественно освоены для линий 6 и 10 кВ, а для линий 35–150 кВ они находятся на апробационной стадии.

Наиболее перспективным видом нетрадиционных способов организации молниезащиты ВЛ является применение мультикамерных изоляторов-разрядников (ИРМК) [5–9]. Они могут быть изготовлены в фарфоровом и полимерном вариантах. Наиболее технологичным и экономичным считается вариант полимерного мультикамерного изолятора-разрядника (ПИРМК).

Далее в статье рассмотрим результаты сравнительного анализа упомянутых альтернативных способов молниезащиты ВЛ (подстанций) 35–150 кВ.

В статье под термином «альтернативные методы» молниезащиты понимается такой метод или способ, при котором показатель надежности молниезащиты ВЛ (подстанций) будет не меньше, чем такой показатель по способу или методу, рекомендуемому ПУЭ, и имеющий место в настоящее время.

Как отмечалось выше, нельзя рассматривать молниезащиту ВЛ и подстанций отдельно, обе эти задачи неразрывно связаны между собой и служат для решения одной и той же проблемы передачи и распределения электроэнергии.

Основными альтернативными методами молниезащиты сетей 35–150 кВ являются:

применение каскадных схем молниезащиты [3];

использование мультикамерных изоляторов-разрядников [5–9];

использование благоприятного влияния большого числа ВЛ, отходящих от подстанции;

использование коммутационной способности выключателей;

установка ОПН на ВЛ на опасных участках.

Каскадный принцип молниезащиты предусматривает включение нескольких защитных аппаратов «по ходу молниевых волн». Это обеспечи-

вадет последовательное ограничение перенапряжений и дает возможность отказаться от тросов на подходах к подстанциям или существенно сократить их длину, снизить требования к заземлению опор вблизи подстанций. Такой способ особенно важен для районов страны, где большое удельное сопротивление грунтов.

В последние годы в ОАО НПО «Стример» разработан и внедрен в эксплуатацию ряд *длинноискровых защитных аппаратов* от 6 до 220 кВ для улучшения молниезащиты ВЛ, а следовательно, подстанций. Они бывают разных типов: шлейфного типа (РДИШ), модульного типа (РДИМК), изоляторы-разрядники мультикамерные типа ИРМК. Новейшие из последних — полимерные изоляторы-разрядники мультикамерные типа ПИРМК [5–9]. Эти защитные аппараты не только обеспечивают молниезащиту ВЛ, но и улучшают молниезащиту подстанций в несколько раз.

В северных сетях есть ряд подстанций 35–150 кВ, от которых отходит большое количество ВЛ. В таких случаях одним из альтернативных способов отказа от тросов и РТ является использование *благоприятного влияния отходящих ВЛ в числе более четырех*.

Предположим, что по одной из  $n$  линий на подстанцию приходит молниевая волна. При этом остальные  $(n - 1)$  ВЛ представляют собой эквивалентное волновое сопротивление  $Z_3 = \frac{Z_B}{n-1}$ , где  $Z_3$  — волновое сопротивление одной фазы одной ВЛ. Так, например, если  $n = 6$ ,  $Z_B = 400$  Ом, то  $Z_3 = \frac{400}{6-1} = 80$  Ом. Такое эквивалентное сопротивление подстанций в первом приближении равно динамическому сопротивлению вентильных разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжений. То есть большое число ВЛ, отходящих с подстанции, эквивалентно дополнительному защитному аппарату на подстанции. По этой причине длина опасной зоны молниезащитных тросов получается порядка десятков метров, которыми можно пренебречь и отказаться от молниезащитных тросов.

Как известно из [1, 4], допустимое число молниевых отключений ВЛ и выбор молниезащиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей определяется по формуле

$$N_{\text{доп г}} = N_0 \beta_{\Gamma} \frac{1}{T_{\text{пр}} (2 - K_{\text{АПВ}})} K_B,$$

где  $N_0$  — допустимое без ремонта выключателя количество отключений номинального тока короткого замыкания;  $T_{\text{пр}}$  — средний период планового ремонта выключателей, год;  $\beta_{\Gamma}$  — отношение числа молниевых отключений к общему числу автоматических отключений;  $K_{\text{АПВ}}$  — коэффициент успешности АПВ;  $K_B$  — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации выключателей, длину ВЛ, значение тока КЗ в ближайшей к шинам подстанции точке ВЛ и изменение коммутационного ресурса выключателей при удалении точки КЗ от шин ПС.

При отсутствии уточняющих местных инструкций значения  $T_{\text{пр}}$  в соответствии с ПТЭ для масляных, воздушных и элегазовых выключателей принимаются из диапазонов соответственно 6–8, 4–6 и 12 лет.

По опыту эксплуатации сетей 35–150 кВ в РФ для  $\beta_{\Gamma}$  получены средние величины  $\beta_{\Gamma} = 0,09-0,1$ . Коэффициент успешности АПВ ( $K_{\text{АПВ}}$ ) для сетей 35–150 кВ равен  $K_{\text{АПВ}} = 0,7-0,75$ .

Ресурс, расходуемый при одной коммутации из  $N_0$ , равен  $1/N_0$ . В общем случае при точке КЗ, удаленной от шин ПС на расстояние  $l$ , выключатель коммутирует ток  $I_l$ , равный

$$I_l = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3} X_{\text{КЗ}}} = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3} (X_c + X_d l)} < I_0,$$

где  $X_c$  — реактивное сопротивление прямой последовательности системы относительно шин подстанции, Ом. Оно определяется по величине тока КЗ при среднеэксплуатационном рабочем напряжении  $U_{\text{экс}}$  в ближайшей к шинам ПС точке ВЛ со стороны линейного вывода выключателя:

$$X_c = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3} I_{\text{КЗ, мин}}};$$

$X_d$  — удельное индуктивное сопротивление ВЛ по прямой последовательности, Ом/км.

Комплекс молниезащиты ВЛ 35–150 кВ, обеспечивающий допустимое число отключений по коммутационному ресурсу выключателя, для ВЛ длиной  $L$ , проходящей в районе с интенсивностью грозовой деятельности  $T_{\text{ч}}$ , сводится к определению предельно допустимого значения импульсного сопротивления  $R_{\text{зи}}$ . Это связано

с тем, что в большинстве случаев конструкция опоры и молниезащитный трос выбираются по другим соображениям.

Значения  $R_{зи}$  определяются по справочным данным после перехода от абсолютного допустимого значения молниевых отключений  $N_{доп}$  к предельному значению удельного числа молниевых отключений  $n_{г\text{пред}}$  на 100 км длины трасы ВЛ и 100 грозových часов по формуле

$$n_{г\text{пред}} = 10^3 \frac{N_{допг}}{T_ч I}$$

В расчетах варьировались следующие факторы:

- а) тип выключателя (то есть,  $I_0$ ,  $I_{пр}$  и  $N_0$ );
- б) длина ВЛ (5, 10, 20, 30, 50 и 100 км);
- в) ток КЗ ( $I_{КЗ} = I_0$ ;  $I_{КЗ} = 0,5I_0$ );
- г) интенсивность грозовой деятельности ( $T_ч$  — 5; 10; 20; 40 часов);
- д) число изоляторов в гирлянде и их строительная высота;
- е) предельное значение  $R_{зи}$ .

Расчеты показали, что по критерию коммутационной способности выключателей при фактических величинах токов короткого замыкания, равномерном распределении места возникновения КЗ (полагаем, что импульсные перекрытия с дальнейшим переходом в устойчивое КЗ происходят только на опорах), длинах ВЛ 35–150 кВ, интенсивности грозовой деятельности, числе изоляторов в гирлянде и предельных значениях импульсного сопротивления опор, характерных для районов Крайнего Севера РФ, в подавляющем большинстве случаев молниезащита ВЛ 35–150 кВ обеспечивается без тросов и РТ.

При отказе от молниезащитных тросов и трубчатых разрядников на подходе в ряде случаев несколько ухудшается показатель надежности молниезащиты подстанций. Для компенсации такого ухудшения можно рекомендовать следующее:

а) установку дополнительного защитного аппарата, например ОПН вблизи линейного разъединителя;

б) замену вентиляльных разрядников на ОПН;

в) применение ПИРМК на 2–3 опорах вблизи подстанций.

Установка дополнительного защитного аппарата (ОПН вблизи линейного разъединителя) фактически является развитием каскадных схем. Для удобства эксплуатации дополнительный защитный аппарат устанавливается не на линии, а на территории подстанции, причем установка этого аппарата вблизи линейного разъединителя (ЛР) одновременно обеспечивает защиту ЛР и выключателя (отделителя), если ВЛ находится в горячем резерве и в случаях повторных ударов молнии при АПВ.

Весьма перспективными защитными аппаратами в схемах молниезащиты подстанций являются ОПН. Важно, что малые габариты всех ОПН делают их установку в любой точке подстанции более легкой и дают возможность уменьшить размеры устройства. Использование ОПН позволяет существенно повысить надежность молниезащиты подстанций и сократить длину опасной зоны подхода. Наиболее актуально это для районов с высокими значениями  $r_{гр}$ . Исследования показали, что при прочих равных условиях использование ОПН в сетях любого класса напряжения в значительной степени улучшает надежность молниезащиты подстанций. Для сетей 35–150 кВ это иллюстрируется данными таблицы.

Можно сказать, что перспективным мероприятием может быть также установка ОПН одновременно на шинах при подходе.

### Выводы

Выполнен поиск возможностей отказа от молниезащитных тросов и РТ на ВЛ 35–150 кВ. На примере СЭС «Колэнерго» (филиала МРСК

#### Улучшение показателя надежности молниезащиты при установке ОПН

| Подстанция    | $U_{ном}$ , кВ | Относительная надежность молниезащиты подстанций |
|---------------|----------------|--|
| Тупиковая     | 35/110/150     | 2,0–2,5/2,0–2,3/1,8–2,2                          |
| Проходная     | 35/110/150     | 2,1–2,7/2,0–2,6/1,9–2,5                          |
| Многофидерная | 35/110/150     | 2,2–2,8/2,1–2,7/2,0–2,3                          |

Северо-Запада) показано, что основными средствами молниезащиты остаются молниезащитные тросы и трубчатые разрядники (РТ), обладающие огромными эксплуатационными затратами и неудобствами, но не всегда обеспечивающие достаточную надежность ВЛ и ПС. Поэтому разработаны альтернативные мероприятия по молниезащите ВЛ.

При отказе от молниезащитных тросов и РТ продуктивно использование каскадных схем молниезащиты и ввод в эксплуатацию полимерных мультикамерных изоляторов (ПИРМК) тех же классов напряжения. При большом количестве ВЛ (более четырех) можно также отказаться от мол-

ниезащитных тросов, так как здесь оказывает благоприятное влияние уменьшенное эквивалентное волновое сопротивление параллельных ВЛ, что можно рассматривать как защитный аппарат.

В районах Крайнего Севера можно успешно использовать коммутационную способность выключателей между двумя капитальными ремонтами.

Достаточно перспективно применение ПИРМК, которые выполняют функцию изолятора и защитного аппарата.

Технико-экономические расчеты показали, что практически всегда целесообразен отказ от молниезащитных тросов и РТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройств электроустановок (ПУЭ). 7-е издание, переработанное и дополненное. М., 2011.
2. **Дергаев Ю.М., Ефимов Б.В., Захри И.М.** Расчет числа грозových отключений ЛЭП в условиях Крайнего Севера // В кн.: Передача и распределение электроэнергии в районах Севера. Апатиты, 1989.
3. **Костенко М.В., Невретдинов Ю.М., Халилов Ф.Х.** Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. Л.: Наука, 1984.
4. **Ефимов Б.В., Невретдинов Ю.М., Данилин А.Н., Халилов Ф.Х., Гумерова Н.И.** Анализ надежности грозозащиты подстанций. Современные проблемы // Новости электротехники. 2009. №4(58). С. 48–51; №5 (59). С. 42–45.
5. **Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакуцкий Е.С., Пильшиков В.Е., Сиваев А.Д.** Грозозащита ВЛ 10–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников // Электричество. 2010. №10. С. 25–27.
6. **Подпоркин Г.В.** Разработка мультикамерных изоляторов-разрядников для ВЛ 220 кВ без грозозащитного троса // Энергетик. 2010, №12. С. 10–14.
7. **Подпоркин Г.В., Пильшиков В.Е., Енькин Е.Ю.** Разработка полимерных мультикамерных изоляторов-разрядников 35 и 110 кВ. Постановка задачи // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. Вып. 4 (29). С. 143–154.
8. **Подпоркин Г.В., Пильшиков В.Е., Енькин Е.Ю.** Разработка полимерных мультикамерных изоляторов-разрядников 35 и 110 кВ // Новое в российской энергетике, 2012. Вып. 2. С. 24–42.
9. **Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Подпоркин Г.В., Степанов В.П.** Электромагнитная совместимость и разработка мероприятий по улучшению защиты от перенапряжений сетей 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 2009.
10. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. Н.Н. Тиходеева. 2-е издание. СПб.: Изд-во ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.

### REFERENCES

1. Pravila ustroystv elektroustanovok [Electrical installation code] (PUE). 7-ye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye. (rus.)
2. **Dergayev Yu.M., Yefimov B.V., Zakhri I.M.** Raschet chisla grozovykh otklyucheniy LEP v usloviyakh Kraynego Severa [The calculation of the number of lightning blackouts transmission lines in the Far North]. *V knige: Peredacha i raspredeleniye elektroenergii v rayonakh Severa*. Apatity, 1989. (rus.)
3. **Kostenko M.V., Nevretdinov Yu.M., Khalilov F.Kh.** Grozozashchita elektricheskikh setey v rayonakh s vysokim udelnym soprotivleniyem grunta [Lightning protection of electric grids in areas with high soil resistivity]. Leningrad.: Nauka, 1984. (rus.)
4. **Yefimov B.V., Nevretdinov Yu.M., Danilin A.N., Khalilov F.Kh., Gumerova N.I.** Analiz nadezhnosti grozozashchity podstantsiy [The reliability analysis of lightning protection of substations]. *Sovremennyye problemy. Novosti elektrotekhniki*. 2009. №4(58). S. 48–51; №5 (59). S. 42–45. (rus.)
5. **Podporkin G.V., Yenkin Ye.Yu., Kalakutskiy Ye.S., Pilshikov V.Ye., Sivayev A.D.** Grozozashchita VL 10–35 kV i vyshe pri pomoshchi multikamernykh razryadnikov i izolyatorov-razryadnikov. [Lightning protection of 10–35 kV overhead powerlines with Smartinsulator glass and smartinsulator composite]. *Elektrichestvo*. 2010. №10. S. 25–27. (rus.)



6. **Podporkin G.V.** Razrabotka multikamernykh izolyatorov-razryadnikov dlya VL 220 kV bez grozozashchitnogo torosa [Development of Smartinsulator Glass for 220 kV overhead power lines without lightning protection wire]. *Energetik*. 2010. №12. S. 10–14. (rus.)

7. **Podporkin G.V., Pilshikov V.Ye., Yenkin Ye.Yu.** Razrabotka polimernykh multikamernykh izolyatorov-razryadnikov 35 i 110 kV. Postanovka zadachi [Development of Smartinsulator Composite for 35–110 kV. Formulation of the problem]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2011. Vyp. 4 (29). S. 143–154. (rus.)

8. **Podporkin G.V., Pilshikov V.Ye., Yenkin Ye.Yu.** Razrabotka polimernykh multikamernykh izolyatorov-razryadnikov 35 i 110 kV [Development of Smartinsulator

Composite for 35–110 kV]. *Novoye v rossiyskoy energetike*. 2012. Vyp. 2. S. 24–42. (rus.)

9. **Khalilov F.Kh., Goldshteyn V.G., Podporkin G.V., Stepanov V.P.** Elektromagnitnaya sovmestimost i razrabotka meropriyatiy po uluchsheniyu zashchity ot pere-napryazheniy setey 6–35 kV [Electromagnetic compatibility and development of measures to improve the protection against overvoltage at 6–35 kV power grids]. Moskva: Energoatomizdat, 2009. (rus.)

10. Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy [Guidelines on the Protection of 6–1150 kV electric power grids against lightning and surge overvoltages] / Pod nauchnoy red. N.N. Tikhodeyeva. 2-e izdaniye. Sankt-Peterburg: Izd-vo PEIPK Mintopenergo RF, 1999. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХАЛИЛОВ Ферудин Халилович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: eddikot@gmail.com

**КОТЛЯРОВ Эдуард Русланович** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: eddikot@gmail.com

#### AUTHORS

**KHALILOV Ferudin Kh.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: eddikot@gmail.com

**KOTLYAROV Eduard R.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: eddikot@gmail.com