

УДК 621.311

Дмитрий Валерьевич Коткин

ФГАОУ ВО «СПбПУ», аспирант, ИЭ, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: dvkotkin@gmail.com

Евгений Юрьевич Енькин

АО «НПО «Стример»», ведущий научный сотрудник, научное подразделение, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: evgeniy.enkin@streamer.ru

Владимир Яковлевич Фролов

ФГАОУ ВО «СПбПУ», профессор ВШЭС, доктор технических наук, профессор, ИЭ, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: frolov.eed@gmail.com

Электрические испытания мультикамерных разрядников открытого типа

Авторское резюме

Состояние вопроса. Согласно ПУЭ, все линии 110 кВ и выше должны оборудоваться молниезащитным тросом. Однако при попадании молнии в трос или стойку опоры и прохождении тока через заземляющее устройство опоры на ней поднимается потенциал, что может инициировать обратное перекрытие линейной изоляции. Такие перекрытия приводят к установлению дуги короткого замыкания, отключению линии, а также могут привести к различным аварийным ситуациям. Для защиты линий 110 кВ с молниезащитным тросом целесообразно применять дополнительные устройства – мультикамерные разрядники. В связи с этим актуальным является проведение испытаний новых устройств – мультикамерных разрядников открытого типа.

Материалы и методы. Исследования и испытания проведены на уникальных установках, моделирующих удар молнии в линию. Стенд ГИН-300К способен одновременно подавать на испытуемый образец импульсный ток до 60 кА и сетевое напряжение до 30 кВ. Высоковольтный ГИН формирует импульс напряжения 1,2/50 с амплитудой до 2 МВ, а источник высокого напряжения переменного тока позволяет провести испытания на выдерживаемое напряжение промышленной частоты до 200 кВ (50 Гц).

Результаты. Описан комплекс электрических испытаний нового устройства производства компании АО «НПО «Стример» – мультикамерного разрядника открытого типа. Проведена оценка отключающей способности на токах обратных перекрытий, координации с линейной изоляцией на стандартных грозовых импульсах напряжения, а также импульсах с крутым фронтом. Кроме того, проведена проверка на выдерживаемое напряжение промышленной частоты.

Выводы. Мультикамерные разрядники открытого типа успешно прошли полный цикл электрических испытаний согласно требованиям стандарта ПАО «Россети» и техническим условиям. Разработанное устройство для защиты от обратных перекрытий линий 110 кВ с установленным молниезащитным тросом может быть рекомендовано для практического применения в целях предотвращения различных аварийных ситуаций при воздействии неблагоприятных атмосферных явлений.

Ключевые слова: молниезащита, мультикамерные разрядники, обратные перекрытия, гашение дуги «в импульсе», линейная изоляция

Dmitry Valerievich Kotkin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Postgraduate Student, Institute of Energy, Russia, Saint Petersburg, e-mail: dvkotkin@gmail.com

Evgeny Yurievich Enkin

Streamer Electric Company, Leading Researcher, Scientific Division, Russia, Saint Petersburg, e-mail: evgeniy.enkin@streamer.ru

Vladimir Yakovlevich Frolov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Institute of Energy, Russia, Saint Petersburg, e-mail: frolov.eed@gmail.com

Electrical testing of opened-type multichamber arresters

Abstract

Background. According to Rules for Electrical Installations, all 110 kV and higher power lines must be equipped with a ground wire (GW). However, when lightning strikes GW or a pole and current passes through the pole footing resistance,

the potential on it rises and can initiate a back flashover of the line insulation. Such flashovers lead to a short-circuit arc, disconnection of the line, and can also lead to various emergency situations. To protect 110 kV power lines with GW, it is advisable to use additional devices such as multi-chamber arresters. In this regard, it is relevant to conduct tests of new devices, open-type multi-chamber arresters.

Materials and methods. The study and testing have been carried out on unique installations simulating a lightning strike on a power line. The PVG-300K stand is capable of simultaneously supplying a pulse current of up to 60 kA and a line voltage of up to 30 kV to the test sample. The high-voltage PVG generates a voltage pulse of 1,2/50 with an amplitude of up to 2 MV, and the high-voltage AC source allows testing for withstand voltage of industrial frequency up to 200 kV (50 Hz).

Results. A set of electrical tests has been described for a new device manufactured by JSC NPO Streamer, open-type multi-chamber arresters. The breaking capacity on back flashover currents, coordination with line insulation on standard lightning voltage impulses, as well as impulses with a steep front have been assessed. In addition, a test has been carried out on the withstand voltage of industrial frequency.

Conclusions. Opened-type multichamber arresters have successfully passed a total cycle of electrical tests in accordance with the requirements of the PJSC Rosseti standard, as well as technical specifications. Thus, a new device for protection against back flashovers of 110 kV power lines with installed GW can be recommended for practical use to prevent various emergency situations when exposed to adverse atmospheric phenomena.

Key words: lightning protection, multichamber arresters, back flashovers, pulsed arc quenching, linear insulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.057-062

Введение. В современной энергетической системе особое внимание уделяется обеспечению бесперебойного электроснабжения стратегически важных объектов, включая нефтедобывающие комплексы, промышленные предприятия и другие крупные потребители. Надежность их работы должна сохраняться не только при авариях на генерирующих объектах, но и при воздействии неблагоприятных атмосферных явлений, в частности, гроз.

Анализ эксплуатационных данных свидетельствует, что до 20 % аварийных отключений воздушных линий (ВЛ) связано с грозовыми воздействиями. В качестве стандартного решения ВЛ напряжением 110 кВ и выше оснащаются грозозащитными тросами с минимальным углом подвеса [1], что позволяет минимизировать вероятность прорывов. Несмотря на малую вероятность прямого удара молнии в фазный провод (менее 1 %) [2–4], попадание молнии в трос может приводить к перекрытиям изоляции и возникновению устойчивого короткого замыкания (КЗ). Это происходит по причине так называемых обратных перекрытий: при стекании тока через стойку опоры в землю происходит падение напряжения на сопротивлении заземления и, соответственно, повышение потенциала на самой опоре.

Особую сложность представляют участки ВЛ, расположенные в районах Крайнего Севера [5] и горной местности, где наблюдаются значительные колебания удельного сопротивления грунтов вдоль трассы. Высокие сопротивления заземления опор приводят к увеличению вероятности перекрытия изоляции даже при ударах молнии с относительно малыми амплитудами тока, что влечет за собой рост числа грозовых отключений. Следует отметить, что при высоких значениях сопротивления заземления эффективность тросовой защиты снижается до

уровня, сопоставимого с линиями, не оборудованными тросами [6]. Это обуславливает необходимость поиска инновационных решений для повышения надежности работы ВЛ в сложных грунтовых условиях.

В настоящее время для дополнительной защиты ВЛ от молниевых перенапряжений широко применяются специальные аппараты, такие как мультикамерные разрядники [7], а также мультикамерные разрядники закрытого типа [8]. Их использование особенно важно на линиях, питающих предприятия с непрерывным технологическим циклом. Однако при эксплуатации с молниезащитным тросом защитные устройства подвергаются на порядок более слабым [9] воздействиям, что позволяет снизить их материалоемкость и прочность, и, как следствие, стоимость.

РМКО-110. На базе мультикамерных разрядников закрытого типа для защиты линий 110 кВ от прямых ударов молнии (РМКЗ-110) в компании АО «НПО «Стример» были разработаны устройства в облегченном исполнении для защиты линий 110 кВ с установленным молниезащитным тросом от обратных перекрытий – мультикамерные разрядники открытого типа (РМКО-110). Ниже детально рассмотрен комплекс необходимых электрических испытаний для такого класса устройств, а также представлены результаты этих испытаний.

Методы исследования. Принцип работы так называемых разрядников третьего поколения подробно описан в [8]. РМКО-110, ввиду облегченных условий эксплуатации, обладает меньшим запасом прочности, однако специфика обрыва дуги и расположение рабочих элементов совпадают. Разрядник устанавливается на траверсу каждой фазы электрически параллельно линейной изоляции (рис. 1).

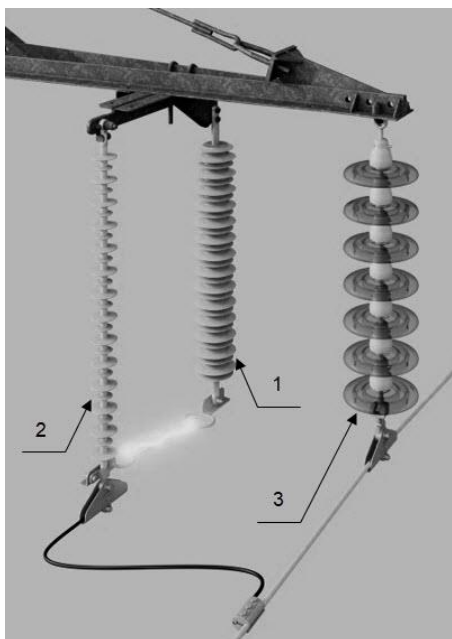


Рис. 1. РМКО-110 на траверсе: 1 – разрядный элемент; 2 – дополнительный изолятор, обеспечивающий стабильный искровой промежуток; 3 – линейная изоляция

Для полноценной проверки электрических характеристик РМКО-110 необходимо провести 3 вида испытаний [10]: испытания на отключающую способность и стойкость к протеканию импульсных токов; проверку возможности защиты линейной изоляции от перекрытий при воздействии импульсного напряжения; испытания одноминутным переменным напряжением.

Испытания на отключающую способность и стойкость к протеканию импульсных токов. ГИН-300К – испытательный стенд, включающий в себя блок моделирования молнии, а также блок моделирования воздействия сетевого напряжения. В качестве первого выступает генератор Аркадьева-Маркса [11], формирующий импульс напряжения 300 кВ с током до 60 кА и длительностью до полупериода до 100 мкс, а сетевое напряжение до 30 кВ с током КЗ до 25 кА создает колебательный контур. Испытательный образец помещается таким образом, что на него одновременно воздействует импульс тока и прикладывается напряжение от колебательного контура. Для успешного прохождения испытания необходимо, чтобы разрядник пропустил импульсный ток, но оборвал сопровождающий ток, стремящийся пройти через образец под воздействием напряжения сети. В схему включается осциллограф с возможностью фиксации осциллограмм тока и напряжения. Эти осциллограммы являются критерием успешности испытаний. Типовые осциллограммы испытаний разрядников представлены на рис. 2.

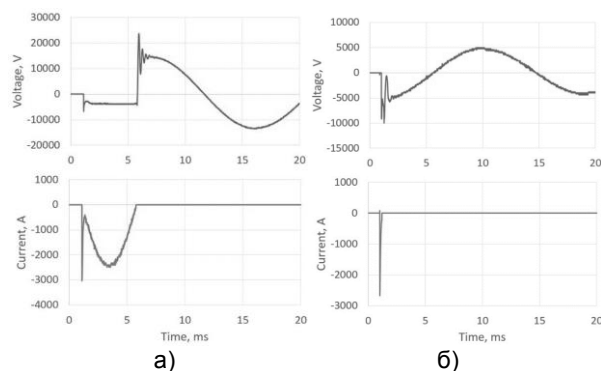


Рис. 2. Типовые осциллограммы напряжения (верхняя) и тока (нижняя): а – гашение в «нуле»; б – гашение в импульсе

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что в случае гашения в «нуле» после прохождения тока молнии через разрядник также проходит часть полупериода сопровождающего тока. В случае гашения в «импульсе» ток сети либо вообще не заходит в разрядник, либо обрывается менее чем за 0,5 мс. РМКО-110 работает по принципу гашения в «импульсе», так как суммарное падение напряжения всех искровых промежутков разрядника существенно выше приложенного напряжения сети, составляющего

$$U_{\text{сети}} = \frac{1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{линейное}}}{\sqrt{3} \cdot k}, \quad (1)$$

где k является коэффициентом масштабирования, так как возможности колебательного контура ограничены напряжением 30 кВ. В связи с этим для испытаний на отключающую способность используется опытный образец, содержащий в k раз меньше рабочих элементов (разрядных модулей) по сравнению с полноценным разрядником (рис. 3).



Рис. 3. РМКО-110 (укороченный образец)

Проверка возможности защиты линейной изоляции от перекрытий при воздействии импульсного напряжения и испытания одноминутным переменным напряжением. Проведение испытаний осуществлялось в соответствии с нормативными требованиями [2], направленными на оценку эффективности защиты линейной изоляции от импульсных перекрытий, вызванных грозовыми перенапряжениями.

В качестве объекта исследований выступал полноразмерный разрядник РМКО-110, подключенный параллельно гирлянде, состоящей из семи подвесных изоляторов ПС-70Е, стандартных для воздушных линий 110 кВ. Конструкция монтировалась на заземленную траверсу, а к проводу подключался высоковольтный вывод генератора импульсного напряжения. Между проводом и электродом разрядника был организован регулируемый искровой промежуток (ИП), обеспечиваемый с помощью шлейфа и дополнительного полимерного изолятора.

Целью эксперимента являлось установление предельной величины ИП, при которой РМКО-110 срабатывает, а линейная изоляция не перекрывается, т.е.

$$U_{\text{разр}} < U_{\text{изол}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{разр}}$ и $U_{\text{изол}}$ – импульсные разрядные напряжения РМКО-110 (с учетом ИП) и линейной изоляции соответственно.

Испытания проводились с постепенным увеличением величины промежутка и при приложении напряжения обеих полярностей стандартных грозовых импульсов (700 кВ/мкс), а также импульсов напряжения с крутым фронтом (около 1,5 МВ/мкс) с зарядным значением напряжения ГИН порядка 1 МВ. Фиксация пути разряда осуществлялась с помощью фотокамеры (рис. 4).

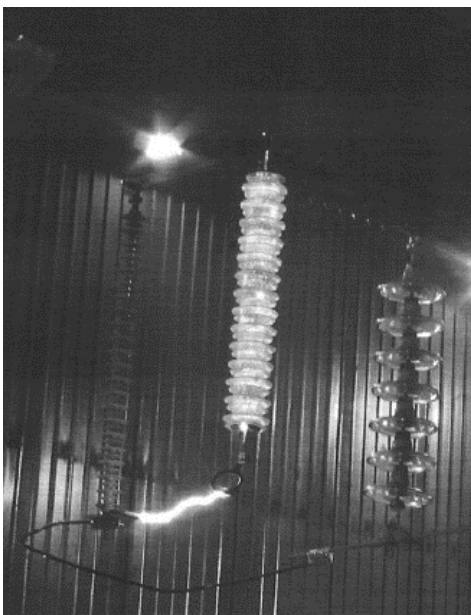


Рис. 4. Срабатывание РМКО-110 при испытаниях на проверку возможности защиты линейной изоляции от перекрытий при воздействии импульсного напряжения

Для определения величины искрового промежутка, а точнее, ее наименьшего значения, необходимо провести испытания на выдерживаемое напряжение промышленной частоты. Испытуемый образец устанавливался аналогично испытаниям на проверку возможности защиты линейной изоляции от перекрытий, т.е. электрически параллельно гирлянде из семи изоляторов ПС-70Е. К системе прикладывалось переменное напряжение промышленной частоты величиной 200 кВ: 5 мин в сухом состоянии и 1 мин с воздействием дождя. Дождь имитировался специальной установкой, распыляющей воду сверху под углом 45 градусов к поверхности разрядника. Данные испытания направлены на определение способности устройств выдерживать кратковременные перенапряжения, возникающие на линии.

Результаты исследования. На отключающую способность было испытано 6 образцов, на каждый из которых было подано по 10 воздействий импульсов 3 кА 1/50 и 8 кА 8/20 с разными полярностями сети: отрицательной и положительной. Все образцы оборвали ток «в импульсе» в 100 % случаев. Пример осциллограммы представлен на рис. 5. Анализ осциллограммы показывает, что через образец прошел ток 8 кА, а сопровождающий ток под действием сети 28 кВ отсутствует, в момент обрыва тока появляется ПВН и напряжение восстанавливается до 50 Гц 28 кВ.

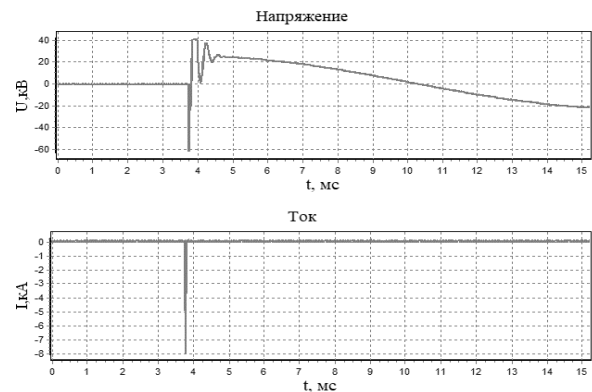


Рис. 5. Осциллограммы напряжения (верхняя) и тока (нижняя) при испытаниях РМКО-110 на отключающую способность

Результаты испытаний на проверку возможности защиты линейной изоляции от перекрытий при воздействии импульсного напряжения, а также испытаний одноминутным переменным напряжением должны оцениваться в совокупности. В первых (испытания на координацию с линейной изоляцией) на каждый из трех образцов было подано по 40 импульсов напряжения (по 10 стандартных грозовых импульсов и по 10 импульсов с крутым фронтом отрицательных и положительных полярностей). Максимальный искровой промежуток, при котором происходит координация РМКО-110 с линейной изоляцией

при воздействии импульсного напряжения, составил 400 мм, напряжение $U_{\text{разр}}$ при этом не превышало 700 кВ (рис. 6).

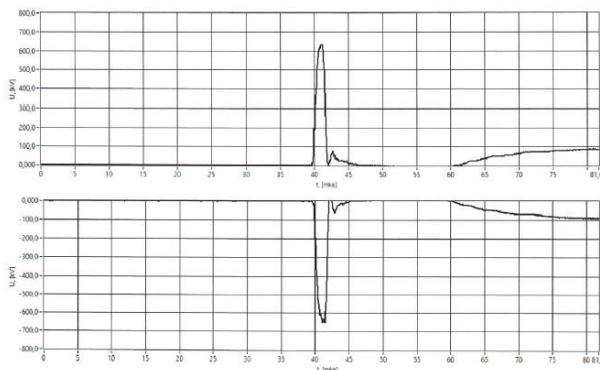


Рис. 6. Осциллограммы напряжения полноценного разрядника РМКО-110 при воздействии стандартного грозового импульса на положительной (сверху) и отрицательной (снизу) полярностях

Минимальный искровой промежуток, при котором РМКО-110 выдерживает приложенное напряжение промышленной частоты 200 кВ, не срабатывает и не перекрывается в течение 5 мин, составил 300 мм. Таким образом, допустимый диапазон внешнего искрового промежутка для РМКО-110 составляет 350 ± 50 мм.

Выводы. Разработанное устройство для защиты ВЛ 110 кВ с установленным молниезащитным тросом от обратных перекрытий, вызванных молниевыми воздействиями, – разрядник мультикамерный открытого типа РМКО-110 – представляет собой аналог разрядника третьего поколения с принципом гашения дуги в «импульсе» (РМКЗ-110), но имеет конструктивные ослабления и изменения.

РМКО-110 прошел полный цикл электрических испытаний и подтвердил свою работоспособность в условиях работы на линии с молниезащитным тросом. Устройство без повреждения выдерживает токи до 12 кА, при этом не допуская возникновения сопровождающего тока сети. Устройство успешно координирует с линейной изоляцией из семи ПС-70Е при воздействии импульсных перенапряжений, а также выдерживает коммутационные перенапряжения на линии 110 кВ без срабатывания и перекрытия в диапазоне внешнего искрового промежутка 350 ± 50 мм.

Список литературы

1. **Правила** устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. – М.: ЭНАС, 2019. – 672 с.
2. **РД 153-34.3-35.125-99** Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. – СПб., 1999.
3. **CIGRE Working Group C4.407 Lightning Parameters for Engineering Applications**, August 2013.

4. **IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**. IEEE Std. 1410-2010.

5. **Халилов Ф., Котляров Э.** Вопросы молниезащиты ВЛ 35–150 кВ в районах Крайнего Севера // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2015. – № 4(31). – С. 60–63.

6. **Недостатки** традиционных мероприятий молниезащиты воздушных линий 110 кВ и предложения по их устранению / Д.В. Коткин, Н.Д. Зарецкий, Д.О. Белько, Е.Ю. Енькин // *Материалы IX Всерос. науч. конф. по атмосферному электричеству*, Санкт-Петербург, 29–28 сентября 2023 года. – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2023. – С. 288–297.

7. **Грозазащита** ВЛ 10–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников / Г.В. Подпоркин, Е.Ю. Енькин, Е.С. Калакутский и др. // *Электричество*. – 2010. – № 10. – С. 11–16.

8. **Мультикамерные** разрядники закрытого типа / Е.Ю. Енькин, А.Д. Сиваев, А.С. Юль, Д.В. Коткин // *Энергетик*. – 2022. – № 12. – С. 23–27.

9. **Kotkin D.V., Enkin E.Y., Belko D.O.** Developing a Line Lightning Protection Device to Protect 110 kV Overhead Lines with Ground Wire from Back Flashovers // *2023 Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS)*. – Saint-Petersburg, 2023. – P. 147–149.

10. **СТО 34.01-2.2-037-2021** Разрядники мультикамерные молниезащитные для воздушных линий электропередачи переменного тока на напряжение 6–110 кВ. Общие технические требования. Правила приемки и методы испытаний. – 2021. – 51 с.

11. **Испытательные** и электрофизические установки высокого напряжения / Ю.Э. Адамьян, И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Э.И. Янчус. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. – 232 с.

References

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok: vse deystvuyushchie razdely i glavy shestogo i sed'mogo izdaniy* [Electrical Installation Rules: all current sections and chapters of the sixth and seventh editions]. Moscow: ENAS, 2019. – 672 p.
2. **RD 153-34.3-35.125-99** *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy* [Guidelines for the protection of 6–1150 kV electrical networks from lightning and internal overvoltages]. Saint-Petersburg, 1999.
3. **CIGRE Working Group C4.407 Lightning Parameters for Engineering Applications**, August 2013.
4. **IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**. IEEE Std. 1410-2010.
5. Khalilov, F., Kotlyarov, E. *Voprosy molniezashchity VL 35–150 kV v rayonakh Kraynego Severa* [Lightning protection issues for 35–150 kV overhead power lines in the Far North]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2015, no. 4(31), pp. 60–63.
6. Kotkin, D.V., Zaretskiy, N.D., Bel'ko, D.O., En'kin, E.Yu. *Nedostatki traditsionnykh meropriyatiy molniezashchity vozdushnykh liniy 110 kV i predlozheniya po ikh ustraneniyu* [Disadvantages of traditional lightning protection measures for 110 kV overhead lines and proposals for their elimination]. *Materialy IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po atmosfornomu elektrichestvu, Sankt-Peterburg, 29–28 sentyabrya 2023 goda* [Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric

Electricity, St. Petersburg, September 29–28, 2023]. Saint-Petersburg: Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F. Mozhayskogo, 2023, pp. 288–297.

7. Podporkin, G.V., En'kin, E.Yu., Kalakutskiy, E.S., Pil'shchikov, V.E., Sivaev, A.D. Grozozashchita VL 10–35 kV i vyshe pri pomoshchi mul'tikamernykh razryadnikov i izol'yatorov-razryadnikov [Lightning protection of overhead power lines of 10–35 kV and higher using multichamber arresters and insulator-arresters]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 10, pp. 11–16.

8. En'kin, E.Yu., Sivaev, A.D., Yul', A.S., Kotkin, D.V. Mul'tikamernye razryadniki zakrytogo tipa [Closed-type multichamber arresters]. *Energetik*, 2022, no. 12, pp. 23–27.

9. Kotkin, D.V., Enkin, E.Y., Belko, D.O. Developing a Line Lightning Protection Device to Protect 110 kV Overhead Lines with Ground Wire from Back Flashovers. 2023

Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS). Saint-Petersburg, 2023, pp. 147–149.

10. STO 34.01-2.2-037-2021 *Razryadniki mul'tikamernye molniezashchitnye dlya vozdukhnykh liniy elektroperedachi peremennogo toka na napryazhenie 6–110 kV. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Pravila priemki i metody ispytaniy* [Multichamber lightning arresters for overhead AC power lines with voltages of 6–110 kV. General technical requirements. Acceptance rules and testing methods]. 2021. 51 p.

11. Adam'yan, Yu.E., Bogatenkov, I.M., Bocharov, Ju.N., Yanchus, E.I. *Ispytatel'nye i elektrofizicheskie ustanovki vysokogo napryazheniya* [High voltage testing and electrophysical installations]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo SPbGPU, 2012. 232 p.