

Научная статья

УДК 614.841

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.59.33.007

Пожарно-техническое исследование взрыва и пожара шунтирующего реактора

Руслан Олегович Морозов¹

Галина Викторовна Плотникова²

Анатолий Александрович Шеков^{2,3}

Павел Сергеевич Хацкевич⁴

¹ГУ МЧС России по Иркутской области, Иркутск, Россия

²Восточно-Сибирский институт МВД России, Иркутск, Россия

³Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

⁴Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Иркутской области, Иркутск, Россия

Автор ответственный за переписку: Плотникова Галина Викторовна, plotnikovagv@mail.ru

Аннотация. В статье изложены результаты пожарно-технического исследования взрыва и пожара шунтирующего реактора, произошедшего при выполнении испытательных работ после его ремонта. Характер развивающихся в трансформаторе повреждений определялся по соотношению концентраций газов, растворенных в трансформаторном масле, таких как водород, метан, ацетилен, этилен, этан, оксид и диоксид углерода. При анализе результатов хроматографического исследования было установлено, что концентрация всех растворенных в масле газов превышала граничные пределы. Это является подтверждением протекания аварийного режима работы в результате короткого замыкания, который привел к разогреву масла и изоляции, повышению давления в баке, разгерметизации и выходу паров масла наружу, к взрыву и пожару.

Ключевые слова: шунтирующий реактор, предохранительный клапан, взрыв, трансформатор, конгломерат, воспламенение, пожар, электропередача

Для цитирования: Морозов Р.О., Плотникова Г.В., Шеков А.А., Хацкевич П.С. Пожарно-техническое исследование взрыва и пожара шунтирующего реактора // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 55-65.

FIRE-TECHNICAL INVESTIGATION OF EXPLOSION AND FIRE SHUNT REACTOR

Ruslan O. Morozov¹

Galina V. Plotnikova²

Anatoly A. Shekov^{2,3}

Pavel S. Khatskevich⁴

¹Deputy Head of the Department of the Regulatory and Technical Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Irkutsk Region, Irkutsk, Russia

²East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, Russia

³Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

⁴Forensic expert institution of the Federal Fire Service "Testing Fire Laboratory" in the Irkutsk region, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Galina V. Plotnikova, plotnikovagv@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the fire-technical investigation of the explosion and fire of the shunt reactor that occurred during the test work after its repair. The nature of the damage developing in the transformer was determined by the ratio of concentrations of gases dissolved in transformer oil, such as hydrogen, methane, acetylene, ethylene, ethane, oxide and carbon dioxide. When analyzing the results of the chromatographic study, it was found that the concentration of all gases dissolved in the oil exceeded the boundary limits, which confirms the occurrence of an emergency operation mode as a result of a short circuit, which led to heating of the oil and insulation, increased pressure in the tank, depressurization and the release of oil vapors outside, which led to an explosion and fire.

Keywords: shunt reactor, safety valve, explosion, transformer, conglomerate, ignition, fire, power transmission

For citation: Morozov R.O., Plotnikova G.V., Shekov A.A., Khatskevich Fire-technical investigation of explosion and fire shunt reactor // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 2 (25). С. 55-65.

Введение

Электроэнергетика является важной составляющей безопасности государства. Состояние энергетической отрасли влияет на развитие экономики, промышленности, сельского хозяйства, военной отрасли, космических исследований и др. Огромное значение имеет обеспечение надежности и безопасной эксплуатации системы электроснабжения, работа которой зависит от таких параметров как напряжения, токи, мощности, фазовые углы, частота и т.д., которые связаны между собой. В процессе эксплуатации системы электроснабжения необходима ее статическая устойчивость, т.е. система должна работать в устоявшемся режиме, что является основой живучести этой системы.

Электроэнергия передается на значительные расстояния, пункты назначения располагаются на удалении друг от друга в десятки тысяч километров. В связи с активным развитием распределенной энергетики, характеризующейся переменным графиком выдачи мощности и, следовательно, нерегулярными изменениями напряжения в сети, растет интерес к шунтирующим реакторам всех типов, которые применяются на подстанциях дальних электропередач. По своей конструкции они близки к трансформаторам и автотрансформаторам. Постоянно расширяется география мест установки и область применения шунтирующих реакторов. Они эффективны при регулировании напряжения и реактивной мощности в автономных энергосистемах, а также при выдаче мощности от генераторов так называемой малой энергетики (ветропарков, солнечной электроэнергетики и т. д.).

Шунтирующие реакторы имеют свои достоинства, к которым относят отсутствие подвижных частей, простота в эксплуатации, применение для широкого диапазона напряжений, возможность регулирования реактивной мощности и использования регулируемого реактора [1-5].

К недостаткам шунтирующих реакторов относят их пожарную опасность и высокую вероятность взрыва. Большое содержание масла, которое может при аварийных ситуациях выходить в окружающую среду в виде нагретых паров или в жидком состоянии, является потенциальной опасностью для окружающих зданий и строений, а также для людей.

Анализ результатов аварийных ситуаций, связанных с шунтирующими реакторами показал, что чаще всего электроустановки были оборудованы традиционными системами электрозащиты. В результате нештатных ситуаций в реакторах резко повышается давление, что в большинстве случаев связано с нагревом масла внутри реактора. Механической системой защиты является защита клапана сброса давления. Анализ произошедших аварий показал,

что современные системы электрозащиты срабатывают в течение 50 миллисекунд, но взрывов избежать не удалось из-за запаздывания сработки клапана сброса давления [6].

В Москве несколько лет назад возникла внештатная ситуация в работе электросетей, которая привела к энергетическому коллапсу, без электроэнергии осталось 7 млн человек. Это происшествие было вызвано взрывом и возгоранием шунтирующего реактора. Разбор ситуации показал, что из-за поврежденного выключателя вышел из строя трансформатор, что и явилось причиной сбоя в электросетях.

В настоящее время продолжается использование шунтирующих реакторов типа РОДЦ-60000/500, имеющих ряд конструктивных недоработок, которые в эксплуатации проявляются повышенной вибрацией, выпадением дистанционных распорок, болтов крепления пружинных демпферов, обрывом выводов экранов или самих экранов, постепенным накоплением окалины и шлака в поддоне, обрывом цепей тока внешних присоединений.

Реактор шунтирующий высоковольтный предназначен для компенсации реактивной мощности, генерируемой линиями электропередач и присоединяется непосредственно к этим линиям. Группа из трех однофазных реакторов соединяется по схеме звезда с глухо заземленной нейтралью.

Корпус реактора представляет собой бак круглой формы с карманом для установки ввода, выполненный из высокопрочной стали. Активная часть реактора смонтирована внутри бака, заполненного трансформаторным маслом. Вспомогательное оборудование смонтировано на баке реактора (рис. 1).



Рис. 1. Шунтирующий реактор РОДЦ-60000/500

Ввод в реактор осуществляется через втулку прорезиненного волокнистого трансформатора, представляющую собой емкостный сердечник, выполненный в виде полый трубы из стекловолокна, вымоченного в эпоксидной смоле низкой вязкости.

К недостаткам этих реакторов относят наличие таких дефектов, которые снижают КПД их работы. Например, при работе реактора может произойти замыкание экранов (электростатических) на магнитную систему, расположенную в нижней части реактора. В процессе работы может произойти, обрыв экранов, что может нарушить связь в схеме заземления. Еще одним недостатком является возможность нагрева алюминиевых электромагнитных экранов.

При наличии таких недостатков нарушается правильная эксплуатация, изменяется электроизоляционная способность масла, возможен пробой изоляции, увеличивается интенсивность газообразования в масле, что в свою очередь может привести к срабатыванию газового реле.

Результаты обследования состояния некоторых таких реакторов показали [6], что при авариях происходило повреждение витковой изоляции обмотки реактора и поэтому в настоящее время необходимо применять более эффективные методы контроля, а также осуществлять поиск решений проблемных вопросов, связанных с изоляцией реакторных вводов 500 кВ. Глубокий анализ внутреннего состояния реакторов, изготовленных в разные временные периоды, показал, что качество их изготовления и сборки снижается.

Случаев возникновения пожаров и взрывов на таких реакторах достаточно много. Например, во время взрыва одного из реакторов произошел разрыв реактора по сварному шву, масло вытекло наружу и загорелось (рис. 2).



Рис. 2. Поврежденный в результате взрыва шунтирующий реактор

В другом случае на одной из подстанций оказался поврежденным масляный выключатель, в результате был поврежден трансформатор, с помощью которого осуществлялась связь сети 500 кВ с сетью 110 кВ, произошел выход масла и его воспламенение. Еще одним примером является взрыв, при исследовании которого по данным осциллограмм было установлено, что взрыв произошел из-за короткого замыкания в активной части трансформатора. В результате взрыва произошло разрушение трансформатора и возник пожар.

Взрывы и последующие пожары могут возникать при пробое изоляции в результате перегрузки, скачка напряжения в электрической цепи, разряда молнии, переключений, при постепенном износе изоляции, недостаточном уровне масла, повышенной влажности, при наличии кислоты в масле, а также при сбоях в сопутствующем оборудовании, таком, как устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) или электрические вводы. Каждый такой случай может привести к очень серьезным последствиям. Например, происходят каскадные отключения электроэнергии, остаются без электрообеспечения как промышленные предприятия, так и жилые комплексы.

По мнению ряда специалистов [6] любой трансформатор рассчитан на определенную мощность, которая является его номинальной мощностью. Но важным параметром является максимальная мощность трансформатора, при превышении которой трансформатор выйдет из строя. При условии, что ток нагрузки поднимается медленно, то трансформатор начинает перегреваться, изоляция при нагревании разрушается и трансформатор выходит из строя в результате короткого замыкания. В такой ситуации автоматический выключатель должен сработать и отключить трансформатор на входе.

Если нагрузки возрастают за очень короткий промежуток времени, тогда автоматические выключатели не успевают среагировать и ток вырастает до критического значения за несколько миллисекунд, что меньше порогового значения автоматических выключателей. Обмотки трансформатора сильно нагреваются, тепло передается охлаждающей среде – минеральному трансформаторному маслу. Теплота при таком интенсивном нагреве отводиться не успевает, давление в масляном резервуаре возрастает и при превышении предела разрушения конструкции трансформатора происходит взрыв.

Анализ материалов по взрывам трансформаторов показал, что в большинстве случаев автоматические выключатели срабатывали своевременно. Но взрывы все равно происходили. При изучении материалов было установлено, что клапан сброса давления является неэффективным при коротких замыканиях.

Следует отметить, что исследования специалистов-энергетиков показывают [6], что короткие замыкания трансформаторов представляют особенно большой риск, так как инерция генератора продолжает питать электрическую дугу в течение относительно большого промежутка времени. Для предотвращения взрыва бака трансформатора такие условия являются наиболее тяжелыми. Выполненные испытания показали, что быстрота возрастания давления в баке, возникающего из-за короткого замыкания, превышает период реагирования всех систем

защиты трансформатора. Эта особенность в первую очередь относится к клапану сброса давления, который не рассчитан на быстрое удаление необходимого количества масла, чтобы избежать взрыва бака трансформатора. При значительных коротких замыканиях клапан сброса давления во многих случаях не успевает открыться [7].

Основная часть

В Иркутской области после проведения ремонтных работ по замене высоковольтных вводов, выполнения регламентированных проверок и испытаний шунтирующий реактор был сдан заказчику и было получено разрешение на ввод шунтирующего реактора в работу и на его проверку под нагрузкой. Для этого стали выполняться действия по включению шунтирующего реактора типа РОДЦ-60000/500. Перед тем как начать испытания реактор был осмотрен, посторонних шумов и каких-либо других признаков, которые указывали бы на нештатную работу оборудования, не было зафиксировано. Персоналом проводились проверки токовых цепей реактора Р-2 в соответствии с программой испытаний. На реактор было подано рабочее напряжение и произошел взрыв фазы С.

Главный щит управления (ГЩУ) находился на третьем этаже здания ОПУ 500. Из окон ГЩУ была видна вся прилегающая территория, в том числе ОРУ 500 кВ. В это время один из свидетелей услышал сильный взрыв. Когда он подошел к окну, то увидел горящий шунтирующий реактор Р-2. Рядом с реактором в тот момент никого из людей не было.

Из показаний участников испытаний шунтирующего реактора следовало, что оборудование реактора перед началом испытания было подготовлено к тушению пожара. Для этого были произведены необходимые переключения, подготовлены места для заземления пожарных машин, пожарные расчеты были допущены к тушению поврежденной фазы.

Прибывшие на место взрыва и последующего пожара на шунтирующем реакторе Р-2 специалисты и эксперты осмотрели место происшествия.

При осмотре места происшествия было установлено, что на территории имелась видеокамера, объектив которой был направлен на реактор. На видеозаписи, снятой с видеокамеры, было видно, что возникновению горения предшествовал физический взрыв, в результате которого произошел отрыв вводной втулки (рис. 3).

Дальнейший осмотр показал, что в объеме установки были зафиксированы сохранившиеся элементы активной части реактора.



Рис. 3. Поврежденный взрывом реактор

В результате повреждения реактора взрывом произошел выход на поверхность достаточно большого объема паров трансформаторного масла, который сопровождался возникновением горения (рис. 4, 5).



Рис. 4. Возникновение горения реактора



Рис. 5. Развившийся пожар после взрыва

При осмотре поврежденного реактора было установлено, что имеются термические поражения в виде выгорания имеющегося лакокрасочного покрытия, наблюдается изменение цвета металла корпуса бака реактора на оранжевый цвет, вследствие образования слоя окалины рыжего цвета, что позволило сделать вывод о внешнем высокотемпературном воздействии порядка 700-750°C (рис. 6).



Рис. 6. Корпус бака реактора с термическим повреждениями

При проведении исследования по определению причины возникновения взрыва и последующего пожара реактора были изучены видеозаписи, протоколы осмотра места происшествия, результаты хроматографического анализа трансформаторного масла на предмет обнаружения растворенных газов, показания участников испытания реактора.

По результатам изучения представленной информации было установлено, что горению предшествовал физический взрыв, а потом возникло горение. В результате взрыва произошел отрыв вводной втулки реактора Р-2 фазы С (рис. 7).



Рис. 7. Оторванная вводная втулка шунтирующего реактора РОДЦ-60000/500

При определении причины взрыва и последующего пожара было установлено, что внутренний объем бака представлял собой герметичный сосуд, заполненный трансформаторным маслом. По результатам осмотра было установлено, что внутри бака реактора возникновение горения было невозможно ввиду отсутствия кислорода. Как следует из теории горения и взрыва, для того, чтобы возник взрыв необходимо наличие окислителя (воздуха), горючего вещества (пожарной нагрузки) и источника зажигания. Пожарной нагрузкой является трансформаторное масло. Было установлено, что для того, чтобы возник пожар (взрыв) масло должно было выйти в окружающую среду. Кроме трансформаторного масла никакой другой пожарной нагрузки, в таком количестве, при котором было бы возможно воспламенение с последующим горением, вокруг реактора зафиксировано не было. Никакого внешнего воздействия на реактор не происходило. Следовательно, разгерметизация бака произойти не могла.

При дальнейшем исследовании были изучены протоколы испытаний сопротивления изоляции электропроводки и электрооборудования. Согласно этим документам при проведении испытаний до выполнения ремонтных работ напряжение на установке соответствовало техническим характеристикам реактора. В протоколах испытаний для фазы А отмечено, что результаты измерения сопротивления изоляции и тангенс угла диэлектрических потерь реактора не превышают 1%, что считается удовлетворительными значениями. Испытания изоляции высоковольтного ввода показали, что увеличение емкости основной изоляции не превышает 5% от емкости, что соответствует требованиям нормативно-технической документации. Аналогичные результаты получены и для фазы В.

При этом токоведущие жилы активной части реактора и его ввода не изменялись.

Непосредственно перед возникновением пожара на трех шунтирующих реакторах была произведена замена высоковольтного ввода. Следует пояснить, что ввод в реактор осуществлялся через «Втулку прорезиненного волокнистого трансформатора», которая выполняет функцию емкостного сердечника. Данный сердечник представляет из себя полую трубу из стекловолокна, которая предварительно вымочена в эпоксидной смоле низкой вязкости. Внутри прокладывается медный гибкий проводник питающий реактор.

После окончания монтажа высоковольтных вводов на реакторы было подано рабочее напряжение. Примерно через 1,5 часа после подачи на реакторы рабочего напряжения произошел взрыв реактора фазы С, а на двух других реакторах (фазы А, В), после их остановки, были отмечены признаки протекания аварийных процессов.

С целью установления причин возникновения аварийных процессов фазы А и В были исследованы протоколы хроматографического исследования растворенных газов в трансформаторном масле.

В методических указаниях по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле [13] указано, что хроматографический анализ газов (ХАРГ) растворенных в трансформаторном масле предназначен для выявления быстроразвивающихся дефектов, вызванных превышением температуры свыше 150°C в активной части силового трансформатора. Согласно [13] при возникновении дуговых и искровых разрядов показателями этих процессов являются водород, метан, ацетилен и этилен и их соотношения.

Если результаты анализа свидетельствуют о том, что в трансформаторном масле концентрации угарного газа и углекислого газа превышают граничные значения, то это является показателем переувлажнения масла или изоляции, или старения изоляции. Если обнаружен углекислый газ, это означает, что происходит перегрев твердой изоляции. Если на хроматограммах зафиксированы этилен, метан, этан, то это является показателем того, что происходит нагрев масла [13].

При анализе протоколов хроматографического исследования газов, растворенных в трансформаторном масле, установлено, что концентрация газов в масле до замены высоковольтных вводов соответствовала нормам и не превышали граничных условий. После подачи напряжения на реактор фазы А и фазы В, в трансформаторном масле зафиксированы превышения концентрации таких газов как водород, оксид углерода (II), метан, углекислый газ, этилен, ацетилен.

Вид развивающихся в трансформаторах дефектов (тепловой или электрический) можно ориентировочно определить по отношению концентраций. Для этого рассматриваются четыре пары следующих газов: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 .

Если соотношение концентраций ацетилена/этилена и метана/водорода имеют следующие значения:

$$\frac{C_{2H_2}}{C_{2H_4}} \geq 0,1 \text{ и } \frac{CH_4}{H_2} \leq 0,5,$$

то это свидетельствует о развитии процесса «разряда». Если же соотношения этих газов имеют такие значения:

$$\frac{C_{2H_2}}{C_{2H_4}} < 0,1 \text{ и } \frac{C_{H_4}}{H_2} > 0,5,$$

то это свидетельствует о развитии процесса перегрева. В случае, когда концентрация угарного газа меньше 0,05%, то это значит, что идет процесс перегрева масла, а если концентрация СО превышает 0,05%, это является свидетельством перегрева изоляции.

При анализе результатов хроматографического исследования было установлено, что концентрация всех растворенных в масле газов превышала граничные пределы, что является подтверждением того, что протекал аварийный процесс. При определении соотношений газов получены следующие результаты:

$$\frac{C_{2H_2}}{C_{2H_4}} = \frac{0,00364}{0,0394} = 0,092, \text{ что меньше } 0,1; \frac{C_{H_4}}{H_2} = \frac{0,14797}{0,081180} = 2,19,$$

что больше 0,5. Полученные результаты показывают, что процесс «разряда» отсутствовал. Так как полученные результаты $0,092 < 0,1$, $2,19 > 0,5$, значит, что развивался процесс перегрева. Так как концентрация угарного газа СО составила 0,118690 %, что превышает 0,05%, следовательно, происходил процесс перегрева изоляции.

Превышение концентрации углекислого газа выше граничного значения (0,4259% и 0,4000% соответственно) свидетельствует о перегреве изоляции.

Превышение данных показателей может свидетельствовать о протекании в активной части реактора (заполненной трансформаторным маслом) аварийных процессов, выраженных в виде перегревов токоведущих соединений и элементов конструкции остова. Согласно результатам хроматографического анализа и определения соотношения концентраций растворенных газов, в масле разряды не возникали.

По полученным результатам хроматографического анализа трансформаторного масла был сформулирован вывод, что на высоковольтном вводе происходил процесс перегрева изоляции, вызванный тепловым режимом работы.

При дальнейшем исследовании проводился демонтаж изделия «Втулка прорезиненного волокнистого трансформатора» с реакторов фазы А и было обнаружено, что внутри полости для прокладки питающего кабеля, в ходе эксплуатации реактора образовался конгломерат их термопластичных полимерных материалов, с металлическими вкраплениями (рис. 8, 9). На основании полученных данных было установлено, что непосредственно в зоне формирования данного конгломерата происходил локальный нагрев, что в свою очередь является следствием протекания аварийного теплового режима работы.



Рис. 8. Внутренняя полость демонтированного изделия «Втулка прорезиненного волокнистого трансформатора» с реактора фазы А

В ходе осмотра данного реактора, в непосредственной близости от бака был обнаружен сплав из металла белого цвета (рис. 9).



Рис. 9. Сплав из металла белого цвета у реактора фазы С

Сопоставляя обнаруженный фрагмент с конструктивными особенностями реактора было установлено, что данный конгломерат является элементом изделия, которое является втулкой прорезиненного волокнистого трансформатора, повреждения которого могли явиться следствием протекания аварийного теплового режима. Это подтверждается результатами хроматографического анализа растворенных газов в трансформаторном масле, соотношение концентраций которых свидетельствует о перегреве изоляции. В результате перегрева образовался конгломерат полимера и металла. В соответствии с «Методическими указаниями по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле» [13] при установлении нарушений в работе трансформаторов повышение концентрации растворенных газов является свидетельством протекания аварийных тепловых режимов работы, таких как токи короткого замыкания. Энергия электрической дуги, которая возникла в результате короткого замыкания и пробоя изоляции, вызвала резкий скачок локальной температуры, а также дуга сгенерировала повышение концентрации растворенных в трансформаторном масле газов, превышающих граничные пределы. Это явилось причиной роста давления в баке, выхода наружу паров масла, последующего взрыва бака и пожара.

Так как аварийные тепловые режимы были зафиксированы в реакторах Р-2 фазы А и В, следовательно, такой же режим возник в реакторе Р-2 фазы С.

Заключение

Проведение пожарно-технического исследования показало, что разгерметизация внутреннего бака реактора Р-2 фазы С произошло в результате короткого замыкания, вызвавшего нагрев и перегрев твердой изоляции и трансформаторного масла. Данный процесс привел к повышению давления и разрыву бака с выходом масла в окружающую среду. Повышение температуры в результате взрыва привело к воспламенению паров трансформаторного масла.

Список источников

1. Брянецев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35–500 кВ // Электротехника. 2003. № 1. С. 5-13.
2. Долгополов А.Г., Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Новости электротехники. 2012. № 3 (75). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2012/75/04.php>.
3. Долгополов А.Г. Этапы создания УШР – нового оборудования для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения // Энергетик. 2013. № 6. С. 55-60.
4. Bengtsson C., Gajic Z., Khorami M. Dynamic Compensation of Reactive Power by Variable Shunt Reactors: Control Strategies and Algorithms // Conference: CIGRE Session 2012; C1-303.
5. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 Мвар пущен в эксплуатацию // Электричество. 2002. № 3. С. 64-66.
6. Трансформаторы: защита от взрывов и пожаров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://каталог-статей.pf/stroyka/oborudovanie/transformatory-zaschita-ot-vzryvov-i-pozharov.html>.

7. Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие. - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 93 с.
8. Методология судебной пожарно-технической экспертизы: основные принципы. – М.: ФГБУ ВНИИПО, 2013. – 23 с.
9. Осмотр места пожара. Методическое пособие / И.Д. Чешко, Н.В. Юн, В.Г. Плотников и др. – М.: ВНИИПО, 2004. - 340 с.
10. Чешко И.Д. Технические основы расследования пожаров: Методическое пособие. – М.: ВНИИПО, 2002. – 330 с.
11. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара: Монография. В 2-х книгах. – СПб.: СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. – Кн. 1. – 708 с.
12. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. В 2-х книгах. – СПб.: СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2012. – Кн. 2. – 364 с.
13. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200053728>.

List of sources

1. Bryantsev A.M., Dolgoplov A.G., Evdokunin G.A., Lipatov Yu.A., Lurie A.I., Makletsova E.E. Magnetization-controlled shunt reactors for 35–500 kV networks // *Elektrotehnika*. 2003. No. 1. S. 5-13.
2. Dolgoplov A.G., Sokolov S.E. controlled reactors. Overview of technologies // *News of electrical engineering*. 2012. No. 3 (75). [Electronic resource]. – Access mode: <http://news.elteh.ru/arh/2012/75/04.php>.
3. Dolgoplov A.G. Stages of creating CSR - new equipment for high and extra high voltage electrical networks // *Energetik*. 2013. No. 6. S. 55-60.
4. Bengtsson C., Gajic Z., Khorami M. Dynamic Compensation of Reactive Power by Variable Shunt Reactors: Control Strategies and Algorithms // *Conference: CIGRE Session 2012; C1-303*.
5. Aleksandrov G.N. Fast-acting controlled reactor of transformer type 420 kV, 50 Mvar put into operation // *Electricity*. 2002. No. 3. S. 64-66.
6. Transformers: protection against explosions and fires. [Electronic resource]. – Access mode: <https://catalogue-articles.rf/stroyka/oborudovanie/transformatory-zaschita-ot-vzryvov-i-pozharov.html>.
7. Ananicheva S.S., Alekseev A.A., Myzin A.L. Electricity quality. Regulation of voltage and frequency in power systems: a tutorial. - Yekaterinburg: UrFU, 2012. - 93 p.
8. Methodology of forensic fire-technical expertise: basic principles. – Moscow: FGBU VNIPO, 2013. – 23 p.
9. Inspection of the fire site. Methodological guide / I.D. Cheshko, N.V. Yun, V.G. Plotnikov and others - M.: VNIPO, 2004. - 340 p.
10. Cheshko I.D. Technical foundations of fire investigation: Methodological guide. - M.: VNIPO, 2002. – 330 p.
11. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Analysis of expert versions of the fire: Monograph. In 2 books. - St. Petersburg: St. Petersburg FGU VNIPO EMERCOM of Russia, 2010. - Book. 1. - 708 p.
12. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. Analysis of expert versions of the fire. In 2 books. - St. Petersburg: St. Petersburg Federal State Institution VNIPO EMERCOM of Russia, 2012. - Book. 2. - 364 p.
13. RD 153-34.0-46.302-00. Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil. [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200053728>.

Информация об авторах

Г.В. Плотникова – кандидат химических наук, доцент

А.А. Шеков – кандидат химических наук, доцент

Information about the author

G.V. Plotnikova – Ph.D. of Chemical Sciences, Docent

A.A. Shekov – Ph.D. of Chemical Sciences, Docent

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2022; одобрена после рецензирования 21.06.2022; принята к публикации 30.06.2022.

The article was submitted 30.05.2022, approved after reviewing 21.06.2022, accepted for publication 30.06.2022.