

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА

© 2019 г. С.П. Высокорец^{1,*}, А.Н. Назарычев^{1,**}

¹ ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» Министерства энергетики Российской Федерации, Россия 196135 Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23
E-mail: * s-151075@yandex.ru; ** nazarythev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2019; после доработки 01.06.2019
Принята к публикации 07.06.2019

Проведен анализ конструктивных особенностей высоковольтных вводов с RIP-изоляцией, с последующей оценкой эффективности применяемых регламентированных диагностических мероприятий. Обнаружен новый критерий косвенной оценки ухудшения изоляционных характеристик высоковольтных вводов с RIP-изоляцией и внешней полимерной изоляцией — появление локальной точки нагрева (приоритетно температурой более 3°C). Продемонстрировано влияние фактора «напряжение» на результативность тепловизионных измерений высоковольтных вводов с полимерной изоляцией. Метод лабораторного моделирования дефекта высоковольтного ввода предложен как вспомогательный для подтверждения наличия и определения места локализации дефекта на поверхности ввода при решении вопросов претензионного характера.

Ключевые слова: ввод, напряжение, тепловизионное измерение, испытание, нагрев.

DOI: 10.1134/S0130308219100075

ВВЕДЕНИЕ

Тренды современной диагностики ориентированы на поиск методов, направленных на раннее выявление дефектов. Принимая во внимание, что в оборудовании с полимерной изоляцией дефекты развиваются стремительно, данная задача становится особо актуальной. Важным и достаточно объективным методом диагностики высоковольтного оборудования является обследование под рабочим напряжением в инфракрасном диапазоне с помощью тепловизора [1, 2].

Согласно технической политике ПАО «Россети» [3], в современной энергетике приоритет в применении высоковольтных вводов 110 кВ отдается вводам с твердой RIP-изоляцией. Вместе с этим в обзоре технологических нарушений [4] отмечена ошутимая аварийность данных функциональных узлов.

В общем количестве нарушений в работе электрооборудования (далее ЭО) повреждения вводов занимают особое место. По оценкам независимых экспертов, по вине вводов происходит до 30 % отказов силовых трансформаторов как в России, так и за рубежом [5]. В отношении вводов с RIP-изоляцией, согласно [4], выявлено 8 случаев повреждения высоковольтных вводов 110 кВ силовых трансформаторов типа ГКТ, ГКТП, находящихся в эксплуатации менее 5 лет с основной причиной повреждения — заводской дефект изготовления. Указанное свидетельствует о том, что проблема надежной эксплуатации вводов стоит как перед эксплуатирующими организациями, так и перед производителями данной продукции.

По статистике, полученной на основании [6], в ДЗО ПАО «Россети» за период 2003 — 2016 гг. зафиксировано 158 случаев аварийного повреждения вводов с RIP-изоляцией и случаев их ранней отбраковки, при этом 147 вводов с RIP-изоляцией оставлено на учащенном контроле и являются потенциально опасными объектами эксплуатации. Следовательно, участвовавшие в последнее время случаи аварий трансформаторного оборудования, оснащенного вводами с твердой RIP-изоляцией, значительное количество ранней выбраковки вводов (задолго до завершения нормативного срока эксплуатации) определяют необходимость вновь вернуться к вопросу эффективного достоверного диагностирования. Учитывая преимущества тепловизионного контроля, как метода диагностирования ЭО «под нагрузкой», интересным для изучения представляется вопрос наличия связи результатов диагностирования методами ИК-контроля и традиционными электрическими измерениями.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОЦЕНКА ДЕФЕКТНОСТИ ФАРФОРОВЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ ВВОДОВ С RIP-ИЗОЛЯЦИЕЙ

В современных вводах между слоями фольги, называемых обкладками, расположены слои RIP-изоляции (Resin Impregnate Paper), которая состоит из слоев специализированной бумаги, пропитанной специальными компаундами. Конструктивно ввод напоминает концентрический коакси-

альный конденсатор, в котором высокий потенциал, от токопроводящего стержня до крышки бака трансформатора, равномерно распределен между обкладками. Последней, внешней обкладкой такого конденсатора является металлическое конструкционное кольцо ввода, при помощи которого сам ввод монтируется в отверстии бака трансформатора. По мере удаления от проводящего стержня ширина (высота) проводящих обкладок уменьшается. Это сделано для того, чтобы высокий потенциал рабочего напряжения обмотки трансформатора распределялся по максимально длинному пути. Кроме того, необходимо, чтобы емкость отдельных элементарных конденсаторов была одинаковой, что важно для равномерного распределения напряжения в радиальном направлении [7, 8].

По результатам оценки закупочной кампании одного из ДЗО ПАО «Россети» установлено, что общее количество приобретенных вводов 110 кВ за период с 2005 по 2013 г. составило 53 шт., среди которых 81 % составили вводы с полимерной внешней изоляцией и 19 % вводы с фарфоровой внешней изоляцией

При проведении плановых испытаний в вышеуказанном субъекте электроэнергетики проанализировано 53 высоковольтных трансформаторных ввода напряжением 110 кВ со сроком эксплуатации до 5 лет с полимерной внешней изоляцией и внутренней RIP-изоляцией, ряд из которых был отбракован. Причиной отбраковки послужило ухудшение электрических характеристик изоляции: изменение емкости (ΔC_1) и рост тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции в сравнении испытаниями после монтажа и заводскими испытаниями соответственно.

Исходя из года выпуска, отбраковка вводов с внешней полимерной изоляцией проводилась в следующих количествах: 2006 г. — 1 шт.; 2007 г. — 5 шт.; 2008 г. — 3 шт.; 2009 г. — 3 шт. С целью устранения выявленных дефектов были проведены следующие работы: замена вводов по заводской гарантии (гарантия 3 года) — 6 шт.; ремонт вводов в заводских условиях — 1 шт.

Первый отбракованный в 2010 г. ввод ГКПТ-II-60-110/630 (2006 г.в.) был отремонтирован в заводских условиях и в 2012 г. повторно смонтирован на трансформатор, введен в работу. В 2013 г. по результатам тепловизионных измерений вышеуказанный ввод вновь был отбракован. Межремонтный период составил 1 год, что указывает на низкую эффективность проведенного ремонта.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

С точки зрения электрической схемы замещения трансформаторный ввод представляет собой цепь из последовательно включенных конденсаторов, образованных проводящими обкладками ввода. Верхний конец этой последовательной цепи конденсаторов подключен к высокому потенциалу — проводящему стержню, а нижний конец соединен с корпусом бака трансформатора. От последней обкладки перед корпусом трансформатора сделан специальный вывод. Данный вывод («test tap» или «измерительный вывод») предназначен для проведения измерений параметров изоляции ввода [7].

Диагностирование высоковольтных вводов с RIP-изоляцией осуществляется на основании [9, 10, 11], согласно которых, оценка технического состояния вводов проводится по результатам электрических измерений: сопротивления изоляции измерительного вывода ($R_{из.в.}$), емкости основной изоляции (C_1), тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ($tg\delta_1$), а также по результатам тепловизионных измерений (далее ТВИ). При этом в отношении организации и интерпретации результатов измерений высоковольтных вводов с RIP-изоляцией отмечены следующие недостатки в действующих нормативно-технических документах:

в части электрических измерений, указанные в разделе 23 документа [9], нормативные значения не согласуются с рекомендациями завода-изготовителя [10];

в части ТВИ в документах [9, приложение 3] и [11, приложение Д] вообще отсутствуют требования к высоковольтным вводам с RIP-изоляцией; также отсутствуют рекомендации по тепловизионному обследованию высоковольтных вводов с RIP-изоляцией в широко применяемом в электроэнергетике нормативном документе [12].

Единственным документом, содержащим комплекс более или менее полно изложенных требований к диагностированию вводов с RIP-изоляцией, является документ [10].

Можно выделить три основных диагностических признака, позволяющих выявлять дефекты состояния высоковольтных трансформаторных вводов [7]:

$tg\delta_1$ — наименее информативный параметр. Причины этому две — слабое влияние потерь в локальной зоне дефекта на параметры всей изоляции ввода и периодическое снижение параметра при шунтировании зоны дефекта пробоем изоляционного промежутка;

частичные разряды в изоляции. Сложность использования этого диагностического параметра заключается также в периодическом появлении и исчезновении разрядов в зоне дефекта, обусловленном пробоем дефектного изоляционного промежутка;

C_1 — наиболее информативный параметр, позволяющий обеспечить эффективное диагностирование вводов трансформаторов. Изменение C_1 в сравнении с результатами измерений после монтажа (далее ΔC_1) позволяет надежно определить опасный дефект, предотвращая аварию ввода, обычно имеющую тяжелые последствия. Величина $\text{tg}\delta_1$ и частичные разряды этого не обеспечивают, так как могут иметь значения, соответствующие нормальным, даже в том случае, когда уже идет необратимое разрушение изоляции ввода.

Важным является то, что обеспечить необходимую точность измерения C_1 , позволяющую достоверно регистрировать ухудшение технического состояния высоковольтных вводов, согласно [10], для ряда диагностического персонала затруднительно, что ведет к игнорированию такого диагностического параметра, как ΔC_1 . При этом наиболее удобным и информативным методом диагностики высоковольтного оборудования является обследование под рабочим напряжением в инфракрасном диапазоне с помощью тепловизора.

Вышеизложенные обстоятельства указывают на необходимость в проведении научного анализа результатов эксплуатационных измерений с целью формирования новых обоснованных требований для организации эффективного диагностирования высоковольтных вводов с RIP-изоляцией.

В ходе планового диагностирования было обнаружено появление локальных нагревов в зависимости от уровня рабочего напряжения:

при линейном напряжении сети 110 кВ у ряда вводов, имеющих ухудшенные электрические характеристики, локальные нагревы не выявлялись. Ряд вводов с ухудшенными электрическими характеристиками позволял найти некоторый слабо выраженный локальный нагрев, возможность обнаружения которого зависела от степени развития дефекта;

при линейном напряжении сети 116 кВ и более легко выявлялись локальные нагревы, например, у трех вводов, установленных на силовых трансформаторах ТМТН 6300/110-71-У1 (место нагрева 2-3 и 4-5 юбки вводов, $U_{л} = 116$ кВ; $U_{ф} = 67,05$ кВ; $\Delta T = 5,3$ °С, рис. 1).

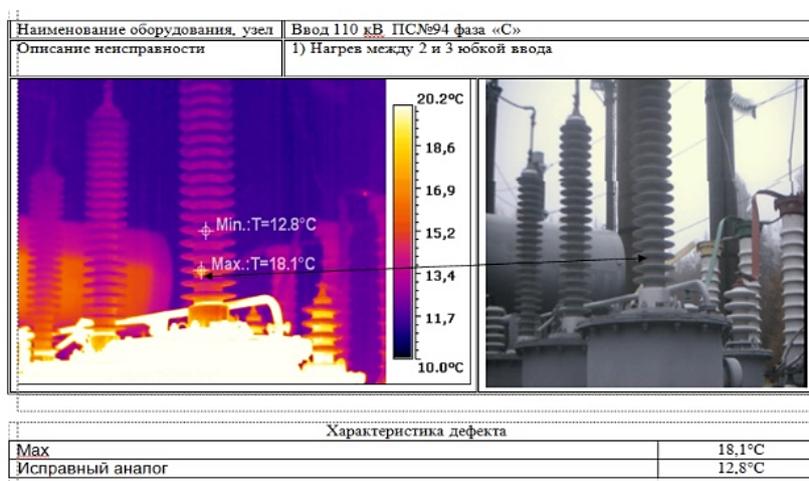


Рис. 1. Термограмма ввода 110 кВ ПС 94 Т-1 ф.С.

Тепловизионный контроль проводился в соответствии с основными положениями Методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ [12] тепловизором ThermoPro™ TP8 (матрица 384×288 элементов, спектральный диапазон 8-14 мкм, ±1 % от показаний)

МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ВВОДОВ С RIP-ИЗОЛЯЦИЕЙ

Для изучения влияния напряжения на результативность ИК-контроля в ходе исследования применено построение физической модели. При физическом моделировании использованы высоковольтные вводы, демонтированные с действующих энергообъектов и ранее отбракованные по результатам плановых электрических измерений (ΔC_1 и $\text{tg}\delta_1$) в одном из ДЗО ПАО «Россети». Целью данной работы являлось исследование влияния приложенного напряжения на выявляе-

мость дефекта высоковольтного ввода с полимерной изоляцией методами инфракрасной термографии, а также определение наличия зависимости результатов тепловизионных и электрических измерений.

Моделирование процесса в лабораторных условиях предполагало подачу напряжения установкой УИВ-100 с ДН-100Е на высоковольтный ввод типа ГКТП (ГКПТ)-110 кВ предположительно с дефектом с параллельным проведением тепловизионных измерений. Работы проводили в два этапа. Этап 1: на изолированный от земли высоковольтный ввод с RIP-изоляцией поочередно подавалось испытательное напряжение U_{ϕ} равное 63, 70, 73, 100 кВ с частотой 50 Гц в течение 30 мин с параллельным тепловизионным измерением. Этап 2: далее к вводу прикладывалось напряжение с шагом 1 кВ, начиная с напряжения 65 кВ с параллельным тепловизионным измерением. Тепловизионные измерения проводили тепловизором ThermoPro™ TP8 в соответствии с требованиями [12] при температуре окружающей среды в диапазоне 16—20 °С.

Обнаружено влияние приложенного напряжения на результат тепловизионного измерения:

при реализации этапа 1 установлено появление на поверхности ввода локального нагрева при U_{ϕ} от 70 кВ и более;

при реализации этапа 2 выявлен порог напряжения равный 66 кВ (U_{ϕ}), при котором надежно обнаруживался локальный нагрев (установлено для всех испытуемых вводов — 9 шт.). При увеличении напряжения более 66 кВ (U_{ϕ}) наблюдался рост температуры пятна локального нагрева, при снижении напряжения ниже 66 кВ (U_{ϕ}) выявлено полное исчезновение пятна локального нагрева.

Установлен экспоненциальный характер зависимости изменения температуры пятна нагрева от приложенного напряжения, R^2 не менее 0,9 (рис. 2).

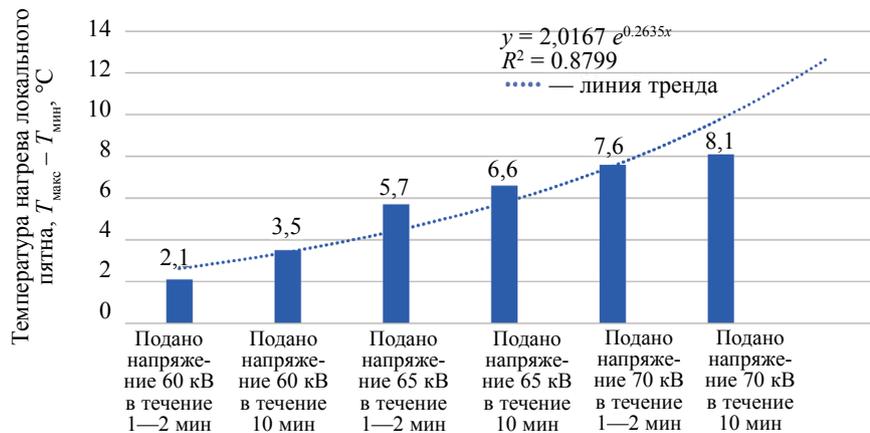


Рис. 2. Зависимость изменения температуры нагрева локального пятнышка ввода 110 кВ ГКДПТ-II-60-110/630 ОI зав. № П11525 от величины приложенного напряжения и времени его воздействия.

Следует отметить, что в ходе моделирования во всех наблюдаемых случаях был зафиксирован рост $\text{tg}\delta_1$ по сравнению с заводскими испытаниями независимо от исходного значения $\text{tg}\delta_1$, при этом исходное значение ΔC_1 в каждом подобном случае было более 5 %. Изменение $\text{tg}\delta_1$ указывает на то, что приложенное воздействие (напряжение) на ввод способствует более яркому проявлению дефекта, увеличению его зоны.

В ходе изучения лабораторной модели дефекта высоковольтного ввода с RIP-изоляцией установлено влияние фактора «напряжение» на результат тепловизионных измерений. В существующей редакции [12] в разделе 2 среди перечисленных факторов, влияющих на ИК-измерение, фактор «напряжение» отсутствует, соответственно фактор «напряжение» подлежит к включению в перечень факторов, рекомендованных к учету при организации ИК-контроля.

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния отклика Dt_1 — температуры пятнышка нагрева от фактора ΔC_1 высоковольтного ввода. Диаграмма рассеяния построена по результатам измерений девяти высоковольтных вводов, имеющих схожее место локализации нагрева/дефекта: между 2 и 3 или между 4 и 5 юбками ввода.

На точечной диаграмме (см. рис. 3) сформирован кластер, а также экспертно выделена заштрихованная область — зона отсутствия локальных нагревов. Опираясь на выделенную зону, сформирован количественный критерий дефекта — температура пятнышка локального нагрева, равная 3 °С, косвенно указывающая на ухудшение изоляции ввода.

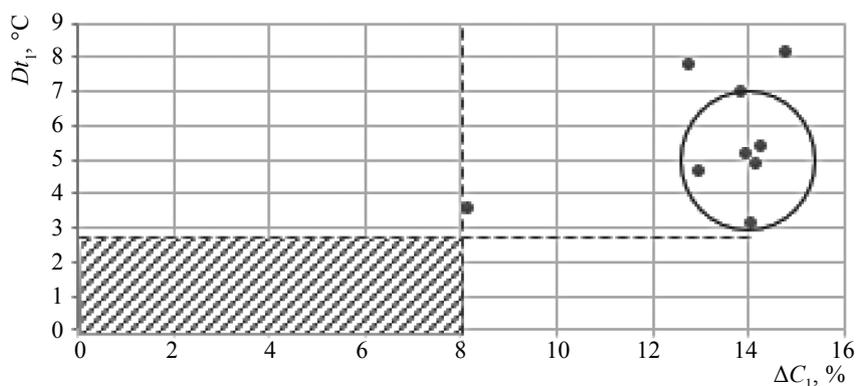


Рис. 3. Диаграмма рассеяния фактора ΔC_1 и отклика Dt_1 ; о — результат измерения.

Высоковольтные вводы, в которых были установлены ухудшенные изоляционные характеристики, а также обнаружено наличие локального нагрева (дефекта между 2 и 3 или между 4 и 5 юбками ввода) были подвержены осмотру со вскрытием.

При вскрытии кремнийорганической покрывки было выявлено (рис. 4): некачественное приклеивание к остову ввода; наличие скрытых незаполненных полостей; некачественное изготовление в части алюминиевых обкладок — «волновой эффект»; некачественный схлест с видимым зазором при соединении в кольцо.

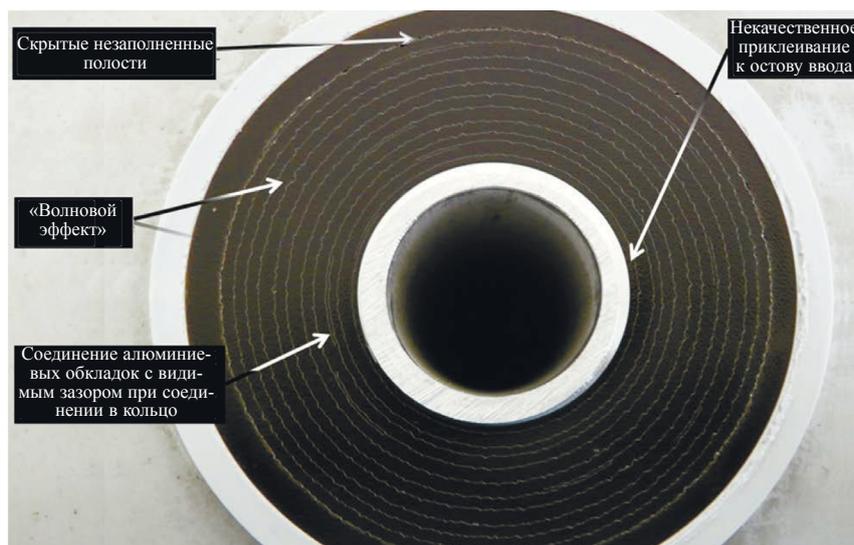


Рис. 4. Фотография обработанного места спила ввода между 4 и 5 юбками.

С учетом результатов вскрытия испытуемых вводов доказано, что обнаружение локальной точки нагрева на поверхности высоковольтного ввода с RIP-изоляцией и внешней полимерной изоляцией является надежным косвенным признаком ухудшения изоляционных характеристик данного функционального узла.

Применение данного подхода в ПАО «МРСК Северо-Запада» позволило своевременно обнаружить 18 дефектных вводов.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований установлено, что обнаружение локальной точки нагрева на поверхности высоковольтного ввода с RIP-изоляцией и внешней полимерной изоляцией является критерием, косвенно определяющим ухудшение изоляционных характеристик данного функционального узла трансформатора.

Исследовано влияние фактора «напряжение» на результативность тепловизионных измерений высоковольтных вводов с полимерной изоляцией: выявлен порог напряжения равный 66 кВ (U_{ϕ}), при котором надежно обнаруживался локальный нагрев, при этом при увеличении напряжения более 66 кВ наблюдался рост температуры пятна локального нагрева. Установлен экспоненциальный характер зависимости изменения температуры пятна нагрева от приложенного напряжения. Соответственно фактор «напряжение» подлежит к включению в перечень факторов, рекомендованных к учету при организации ИК-контроля согласно РД 153-34.0-20.363-99 [12].

Метод лабораторного моделирования дефекта высоковольтного ввода можно рекомендовать как вспомогательный для подтверждения наличия и определения места локализации дефекта на поверхности ввода при решении вопросов претензионного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Г.М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. М.: Додэка-XXI, 2010. 224 с.: ил. -ISBN 978-594120-225-6.
2. Высогорец С.П., Назарычев А.Н., Таджибаев А.И., Горец И.А., Кузнецов Е.П., Сулыненков И.Н., Чекмарев С.Ю., Антонио Педро. Основы стратегии и организации диагностики на предприятиях электрических сетей. Часть 1. Организация диагностики на предприятиях электрических сетей / Под ред. А.И. Таджибаева. СПб.: ПЭИПК, 2018. 75 с. [Библиотека специалиста по ТДНК объектов энергетики, Серия 1. «Методические основы ТДНК», Выпуск 1.6 (16), часть 1].
3. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». М.: МИК, 2017. 272 с.
4. Обзор технологических нарушений (аварий), произошедших в ДЗО ПАО «Россети» в декабре 2015 г., связанных с повреждением нового оборудования, значимыми повреждениями оборудования, ошибками персонала и повторяющимися отключениями ВЛ 110 кВ и выше. М., 2016. 8 с.
5. Материалы XI Международной научно-практической конференции «Трансформаторострое-ние-2005» (Запорожье, Украина). Запорожье: НИЦ «ЗТЗ — Сервис», 2005.
6. Протокол заседания рабочей группы по анализу эксплуатации на объектах ДЗО ПАО «Россети» высоковольтных вводов производства ООО «Масса» / 16.06.2016, ПАО «Россети», г. Москва.
7. Ботов С.В., Русов В.А. Особенности организации защиты и мониторинга трансформаторных вводов с RIP-изоляцией // Информационно-аналитический журнал «ЭнергоЭксперт». 2011. № 6 (29). С. 56—61.
8. Высоковольтные вводы с изоляцией конденсаторного типа для силовых трансформаторов и реакторов. ООО «Масса». Публикация 01.2010. 20 с.
9. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. 6-е изд., с изм. и доп. М.: ЭНАС, 2007. 256 с.
10. Методические указания по эксплуатации высоковольтных вводов с RIP-изоляцией производства ООО «Масса»-завод «Изолятор» / Утверждены распоряжением ПАО «Россети» от 24.06.2016 № 752 р. М., 2016. 22 с.
11. СТО 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования Утверждены распоряжением ПАО «Россети» от 26.05.2017 № 280р «Об утверждении стандарта организации». М. 241 с.
12. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. ОАО «Фирма ОРГРЭС». М., 2000. 140 с.