



Научная статья

УДК 621.314.22.08

<https://elibrary.ru/tqsdvv><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>

Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам

С.Н. Литвинов^{1✉}, В.Д. Лебедев³, А.В. Гусенков³^{1,2,3}Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

Резюме. Цель – подробный анализ статистических данных о причинах выхода из строя высоковольтного оборудования, в частности измерительных трансформаторов тока и напряжения; тщательное изучение факторов, влияющих на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов; исследование существующих методов контроля технического функционирования высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам; разработка основных принципов построения стационарной системы контроля технических возможностей электронных измерительных трансформаторов. При помощи глубокого анализа исследованы существующие научные публикации и объекты авторского права по обозначенной тематике, применен системный подход к проблеме, рассмотрены методы индукции и дедукции, метод классификации, метод абстрагирования. Результатом проведенного исследования стало детальное изучение существующих методов контроля технических способностей высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам. Рассмотрено влияние различных режимных и внешних факторов на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов. Представлены основные принципы построения стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов. На основе проведенного анализа установлено, что повреждаемость измерительных трансформаторов в сетях среднего напряжения составляет порядка 6% от всех аварий, а в сетях 110 кВ и выше – порядка 7. Сделан вывод, что аварии связаны с повреждением изоляции, с некачественным изготовлением и монтажом, с воздействием на оборудование на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов режимных параметров и внешних факторов. С учетом рассмотренных методов контроля технического состояния высоковольтного оборудования авторами предложена функциональная схема стационарной системы контроля технических возможностей электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции.

Ключевые слова: цифровая подстанция, электронный измерительный трансформатор, стационарная система мониторинга, контроль технического состояния, техническая диагностика, методы контроля технического состояния

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» ГК 14.577.21.0276.

Для цитирования: Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В. Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 322–338. EDN: TQSDVV, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>.

POWER ENGINEERING

Original article

Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers

Sergey N. Litvinov^{1✉}, Vladimir D. Lebedev², Aleksey V. Gusenkov³^{1,2,3}Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

Abstract. The objectives of the present study included an analysis of statistical data on the failure causes of high-voltage equipment with a particular focus on current and voltage measuring transformers; a study of factors affecting the technical and functional condition of measuring transformers; a review of available methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers; the development of the basic principles of a stationary system for monitoring the technical capabilities of electronic measuring transformers. A review of available scientific publications and copyright objects on the aforementioned problems was conducted. The results were processed using the principles of systematic approach, as well as induction, deduction, classification and abstraction methods. The existing methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers were analyzed. The influence of various regimes and external factors on the technical and functional state of measuring transformers was investigated. The main principles for developing a stationary system for monitoring the technical condition of electronic measuring transformers were formulated. It was established that the failure of measuring transformers in medium voltage networks accounts for 6% of all failures. In 110 kV and higher-voltage networks, this level reaches 7%. It was found that the majority of accidents is associated with damaged insulation, poor-quality manufacturing and installation of the equipment, the impact of operating parameters and external factors on the technical and functional state of measuring transformers. Based on the considered methods for monitoring the technical condition of high-voltage equipment, a functional scheme of a stationary system for monitoring the technical capabilities of electronic measuring transformers at a digital substation is proposed.

Keywords: digital substation, electronic instrument transformer, stationary monitoring system, technical condition monitoring, technical diagnostics, methods of technical condition monitoring

Funding: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Target Program "Research and Development in Priority Areas of Development of the Scientific and Technological Complex of Russia for the period from 2014 to 2020", project 14.577.21.0276.

For citation: Litvinov S.N., Lebedev V.D., Gusenkov A.V. Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):322-338. (In Russ.). EDN: TQSDVV, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время растет уровень автоматизации объектов электроэнергетики, в частности электрических подстанций. Согласно концепции программы «Цифровая трансформация 2030»⁴, положительный эффект, связанный с ростом автоматизации, заключается в повышении надежности и экономичности генерации, распределения и потребления электроэнергии. Достигается он в том числе и за счет применения современных технических средств и аппаратно-программных комплексов, которые представляют собой интегрированные в технологический процесс цифровые системы измерения параметров электроэнергии, управления высоковольтным оборудованием, релейной защиты и автоматики. Доступ к информации, ее передача и обработка на такой подстанции производятся в цифровом виде, в связи с чем подстанция получила

название «цифровая»⁵.

В соответствии со стандартом⁶, для локальной передачи данных между отдельными устройствами на таких подстанциях применяются общеизвестные протоколы сетевой модели TCP/IP и специальные протоколы [1–3]: об измеренных мгновенных значениях токов и напряжений МЭК 61850-9.2 (англ. Sampled values (SV) – выборочные значения), об изменении состояния дискретных систем МЭК 61850-8.1 (англ. Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE) – объектно-ориентированное событие на подстанции), сервисных и конфигурационных данных в клиент-серверной архитектуре ИСО/МЭК 9506 (англ. Manufacturing Message Specification (MMS) – спецификация производственных сообщений). В информационной структуре подстанции, согласно стандарту⁷, выделяют три иерархических уровня [4, 5].

⁴Концепция «Цифровая трансформация 2030» URL:

http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (10.01.2023).

⁵Программа инновационного развития ПАО «Россети» на 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 г. URL: http://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf (10.01.2023).

⁶ГОСТ Р МЭК 61850. Сети и системы связи на подстанциях. Введ. 01.01.2011.

⁷СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. Введ. 26.02.2020. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.

Однако трехуровневое исполнение цифровой подстанции является не единственно возможным. Существует также вариант, в котором все критические функции (защиты, измерения, управления) выполняются программными модулями, которые могут быть развернуты на различных аппаратных платформах. Соответствующий программно-технический комплекс (ПТК) подстанции носит название iSAS (integrated Substation Automation System) или «интегрированная система автоматизации подстанции» [6]. Архитектура, в которой основные функции распределены между электронными модулями комплексного ПТК с возможностью взаимного резервирования критически важных функций, получила название «кластерная подстанция» или FDA (англ. Flexible Dynamic Architecture – функционально-динамическая архитектура) [7].

В описанных структурах цифровых или высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) важную функцию выполняют измерительные трансформаторы. Могут использоваться традиционные электромагнитные трансформаторы в связке с преобразователями аналоговых сигналов. Однако все больше применение находят электронные измерительные трансформаторы. Электронные или, как их называют в научно-популярной литературе, «цифровые» (далее используется как синоним) трансформаторы имеют существенные преимущества перед электромагнитными трансформаторами и емкостными делителями напряжения [8–10]. Опыт внедрения цифровых трансформаторов показывает, что их стоимость выше классических измерительных трансформаторов. При этом относительная цена снижается с ростом класса напряжения. В связи с этим научный интерес представляет вопрос надежности работы этого нового вида оборудования.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В своем жизненном цикле цифровые трансформаторы проходят сертификационные, приемо-сдаточные, пуско-наладочные, периодические испытания с целью подтверждения обеспечения критически важных па-

раметров функционирования. Однако в отечественной нормативной документации, содержащей сведения об испытаниях и общие технические требования, не учтены все особенности конструкции и режимов работы цифровых трансформаторов. Поэтому, во-первых, некоторые испытания не дают необходимой информации о техническом состоянии отдельных узлов и трансформатора в целом. Во-вторых, из-за отсутствия опыта эксплуатации нового вида оборудования нет информации о его показателях надежности, а нормативная периодичность испытаний не позволяет оценить текущее состояние оборудования и выявить дефекты на ранней стадии.

В работе ставится цель анализа статистики причин выхода из строя высоковольтного оборудования, в частности измерительных трансформаторов, анализа факторов, влияющих на техническое и функциональное состояние измерительных трансформаторов, анализа существующих методов контроля технического состояния высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам, разработка основных принципов построения стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов. Данная система позволит нивелировать ущерб от нарушения электропитания при отказе трансформатора благодаря раннему обнаружению дефектов. При этом удельная стоимость трансформатора с системой контроля технического состояния может оказаться ниже таких затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ввиду сложности комплексного анализа аварийности за длительный период судить о повреждении электротехнического оборудования можно только по немногочисленным открытым источникам. Так, согласно отчету Министерства энергетики, в период с 2014 по 2016 г. на долю повреждений электротехнического оборудования подстанций (ПС) и открытых распределительных устройств (ОРУ), приведших к нарушению электроснабжения потребителей мощностью 10 МВт и более, приходилось порядка 30% от общего количе-

ства аварий. При этом на измерительные трансформаторы наблюдалось 2% отказов [11]. Частой причиной выхода из строя измерительных трансформаторов в классах напряжений 6–35 кВ является повреждение изоляции, а трансформаторов напряжения – феррорезонансы [12].

Согласно [13], за период 1997–2007 гг. на долю измерительных трансформаторов тока в классе 110 кВ и выше приходилось 3,8%, а трансформаторов напряжения – 4,4% от общего числа аварий на ПС и ОРУ. Наибольшее количество повреждений приходится на трансформаторы тока и напряжения класса 110 кВ (порядка 68%). Причины повреждения измерительных трансформаторов приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, одной из основных причин повреждения традиционных измерительных трансформаторов является нарушение изоляции. Стоит отметить, что

повреждаемость маслонаполненных трансформаторов тока составила 87,9%, а элегазовых – 12,1%. Это связано и с малым количеством установленного элегазового оборудования. Кроме того, известны случаи, когда повреждения измерительных трансформаторов сопровождались их возгоранием и пожарами в распределительных устройствах, кумулятивными взрывами с повреждением рядом стоящего оборудования, что вызывало каскадное развитие аварии. К категориям «прочие» и «посторонние воздействия» можно отнести повреждения, связанные с природными явлениями, например, с нерасчетными тепловыми нагрузками. Согласно данным [14], в 2010 и 2011 гг. произошел ряд повреждений измерительных трансформаторов тока и напряжения в связи с длительным периодом аномально высоких температур.

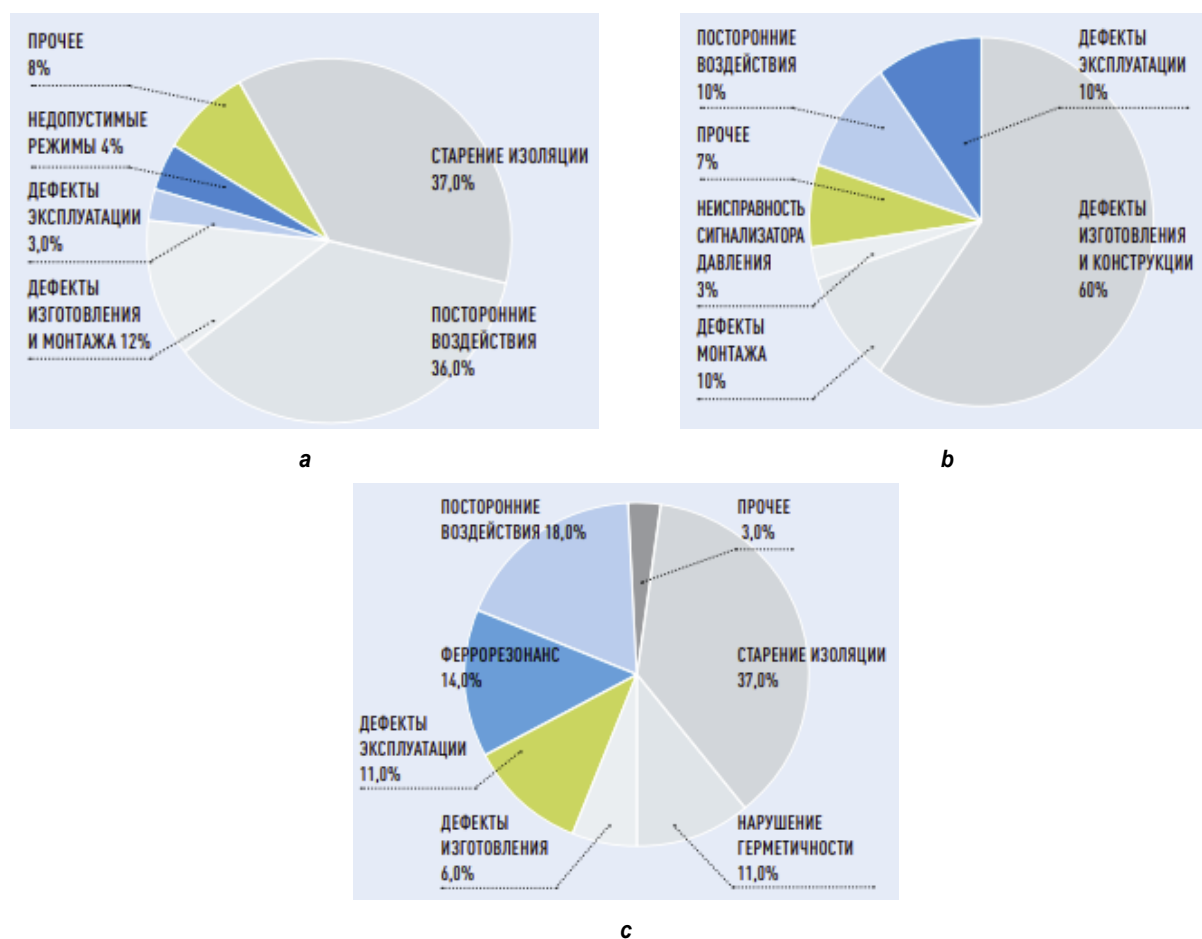


Рис. 1. Причины повреждения измерительных трансформаторов: а – маслонаполненные трансформаторы тока; б – элегазовые трансформаторы тока; в – маслонаполненные трансформаторы напряжения
Fig. 1. Instrument transformer damage causes: a – oil-filled current transformers; b – SF6 current transformers; c – oil-filled voltage transformers

Также участились случаи негативного влияния низких температур.

Из анализа приведенной выше статистики следует, что надежность работы крупных энергосистем и отдельных ее компонентов в большей степени определяется надежностью работы электрооборудования, в частности измерительных трансформаторов. Статистика показывает, что основными причинами отказов являются как естественные процессы, например старение изоляции, так и человеческий фактор – дефекты изготовления и конструкции или неправильная эксплуатация. Дефекты сами по себе могут приводить к полному или частичному (нарушение функционирования) отказу. Появление дефектов в конструктивных частях оборудования возможно на всех стадиях жизненного цикла оборудования. Функциональное нарушение для измерительного трансформатора означает, прежде всего, ухудшение точности преобразования, что негативно сказывается на работе вторичных систем. Поэтому необходимо выявлять дефекты на ранней стадии их возникновения и развития для оценки степени их влияния на техническое состояние трансформатора. Это позволит предсказать момент выхода оборудования из строя и своевременно вывести его из эксплуатации или отбраковать трансформатор на этапе производства или пусконаладочных работ, что, в свою очередь, приведет к снижению затрат на ликвидацию аварий.

В то же время цифровой трансформатор является более сложным объектом, поскольку содержит как маломощные (нетрадиционные) первичные преобразователи, так и устройства электроники и вычислительной техники, объединенные в единую систему, а также в нем используется полимерная внутренняя изоляция [15–18]. Ввиду наличия микроконтроллера и других полупроводниковых элементов надежность трансформатора снижается по отношению к традиционным применяемым решениям, следовательно, требуется принять меры по повышению надежности. Среди основных известных методов в первую очередь применяются резервирование. Оно может быть аппаратным, например, дублирование. Однако данный

метод не всегда оправдан экономически. Другими методами резервирования является функциональное и информационное. Для их применения необходим алгоритм определения однозначного состояния, в котором в данный момент времени находится оборудование. На этот вопрос может ответить техническая диагностика, которая позволяет с помощью различных методов и средств контролировать состояние электрооборудования даже в процессе эксплуатации, т.е. непрерывно [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди факторов, воздействующих на цифровой трансформатор и определяющих его техническое и функциональное состояние, можно выделить те, которые формируются режимом его работы, т.е. внутренние, и те, которые являются внешними по отношению к нему (погодные, климатические, электромагнитные).

К основным внутренним факторам можно отнести:

- рабочее напряжение или перенапряжения (электрическая компонента электромагнитного поля), вызывающие старение [20, 21] и повреждение изоляции (потерю диэлектрических свойств), особенно при наличии механических дефектов, появившихся при изготовлении (вследствие несовершенства технологического процесса), транспортировке, монтаже или в процессе работы цифровых трансформаторов;

- нагрев основных токопроводящих элементов [22], таких как первичная обмотка трансформатора, безиндуктивный шунт, вторичные обмотки трансформатора тока и катушки Роговского, резистивный делитель;

- насыщение магнитопровода трансформатора тока при протекании значительных токов в первичной обмотке (в том числе за счет наличия в токе апериодической составляющей) [23] и его остаточная намагниченность при снятии действия тока [24, 25], что приводит к ухудшению метрологических свойств и как следствие искажению данных;

- питающее напряжение (в том числе опорные напряжения электронных компонен-

тов электронного блока). Ухудшение качества питающего напряжения может привести как к функциональному нарушению, так и к полному отказу трансформатора (как в аналоговой, так и в цифровой его части);

- мощность светового потока на выходе источника и входе приемника данных;
- деградация полупроводников [26].

Основными внешними факторами являются:

- инсоляция (влияние солнечной радиации на нагрев трансформатора);
- температура окружающей среды и движение воздушных потоков (определяет тепловое состояние трансформатора в целом);
- влага, содержащаяся в воздухе, окружающем элементы конструкции измерительного трансформатора, в том числе изоляцию [27];

– пыль и грязь, содержащаяся в воздухе. Она может вызвать снижение пробивного напряжения внешней изоляции;

- ошибки при проектировании, конструировании, сборе и монтаже трансформаторов;

– внешние электромагнитные поля, создаваемые токами, протекающими в первичных и вторичных контурах оборудования, расположенного рядом с цифровым трансформатором, токами молний и т.п. [28]. Электрические и магнитные компоненты полей определяют состояние изоляции трансформатора, электромагнитной системы первичных преобразователей, электромагнитную совместимость электронных модулей и блоков [29]. Изменение электромагнитной обстановки, в которой находится трансформатор, также может привести к нарушению функционального состояния или его отказу.

Таким образом, контролируя ряд параметров в ходе испытаний и в процессе эксплуатации трансформатора, можно определить его текущее состояние, скорректировать точность преобразования с учетом влияния внутренних и внешних факторов и за счет своевременного выявления дефекта и оперативного (при необходимости) вывода оборудования из эксплуатации повысить в целом надежность его работы.

В настоящее время статистика работы цифровых и оптических трансформаторов

[30] в нашей стране практически отсутствует ввиду того, что отечественная промышленность начала выпуск подобного оборудования сравнительно недавно, а объемы закупаемых импортных устройств незначительны. В большинстве случаев производимое и (или) закупленное оборудование используется для реализации пилотных проектов, которые направлены, прежде всего, на совместимости работы устройств разных производителей и апробацию технологии [31–34]. Несмотря на то, что ряд факторов, воздействующих на работу цифровых трансформаторов, определяет работу и традиционных измерительных трансформаторов, благодаря особенностям конструкции первых это воздействие осуществляется иным образом с точки зрения количественных и качественных характеристик. Кроме того, появляются дополнительные факторы, влияющие на техническое состояние цифровых трансформаторов. Рассмотрим существующие способы контроля технического состояния традиционных измерительных трансформаторов и схожего энергетического оборудования, проанализируем их применимость к цифровым трансформаторам и поставим задачу адаптации существующих и разработки новых способов контроля с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей цифровых трансформаторов:

Контроль диэлектрических свойств изоляции измерительного трансформатора. Изоляционные конструкции измерительных трансформаторов должны выдерживать приложенное в ходе испытаний и эксплуатации напряжение, не разрушаясь при этом. Среди основных причин возможного пробоя изоляции можно выделить нарушение целостности изоляции при изготовлении, транспортировке и монтаже трансформаторов, естественные процессы электрического и термического старения, при котором снижается электрическая прочность, аварийное повышение напряжения в процессе эксплуатации, ослабление изоляции при высоковольтных испытаниях [35–38].

Наличие дефектных зон в изоляции, а значит и качество изоляции в целом определяется в ходе испытаний. В настоящее время

не существует нормативных документов, определяющих порядок и виды испытаний для цифровых трансформаторов, поэтому следует руководствоваться существующими на сегодняшний день нормативными документами⁸⁻¹¹.

Основные методы контроля качества изоляции можно разбить на две группы: неразрушающие и условно разрушающие [39]. К неразрушающим методам можно отнести определение тангенса угла диэлектрических потерь $tg(\delta)$, измерение тока утечки, измерение характеристик частичных разрядов и т.д. [40, 41]. К условно разрушающим испытаниям относятся одномоментное испытание изоляции повышенным напряжением, испытание изоляции грозовым импульсом и измерение сопротивления изоляции [40, 42]. Метод испытания повышенным напряжением не всегда является оправданным [43, 44]. Ситуация осложняется тем, что в конструкции цифровых трансформаторов напряжения и в комбинированных (тока и напряжения) присутствует резистивный делитель. Он частично шунтирует изоляцию, а повышенное напряжение может вызвать его тепловое разрушение. Поэтому для цифровых трансформаторов актуальными становятся вопросы определения состояния изоляции при изготовлении и в процессе эксплуатации неразрушающими методами.

Среди неразрушающих методов наиболее перспективным, с точки зрения авторов, является метод измерения характеристик частичных разрядов в изоляции [45], поскольку его можно адаптировать для конструкции цифрового трансформатора. Возникновение частичных разрядов сопровождается различными физическими явлениями, которые используются для их регистрации. Наиболее досто-

верным способом регистрации частичных разрядов можно назвать электрический, поскольку при его применении регистрируемые сигналы имеют наибольшую мощность, что позволяет легче выделять их на фоне помех. Регистрация проводится в соответствии с требованиями международных и отраслевых стандартов в высокочастотном диапазоне частот (0,5–200 МГц). К преимуществам относят наличие стандартов с описанием схем измерения и градуировки для различного оборудования. К недостаткам – сложность локализации частичных разрядов, среднюю помехозащищенность [46, 47]. Суть электрических методов заключается в регистрации импульсного напряжения, формируемого токами частичных разрядов с помощью индуктивных и емкостных датчиков, установленных в цепи протекания этих токов. Результаты применения данного метода при исследовании на макете цифрового трансформатора приведены в [48].

Контроль теплового состояния высоковольтного оборудования. Основным источником нагрева оборудования, в том числе и трансформаторов, является ток, протекающий по токоведущим частям в узлах конструкции (например, в обмотках). Несмотря на то что в номинальном и близких к нему режимах выделенное тепло успевает рассеяться за счет естественной конвекции, в условиях перегрузки и в аварийных режимах тепловыделение может вызвать термическое разрушение элементов конструкции трансформатора. В настоящее время допустимый нагрев обмоток трансформатора тока ведется косвенными методами – по допустимому току (в режимах перегрузки) или интегралу Джоуля (в аварийных режимах)¹². При этом не учитываются изменения внешних условий, в которых находится трансформатор (темпе-

⁸ РД 34.45-41.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Введ. 25.12.2009 (изм. 01.03.2001). М.: НЦ Энас, 2004.

⁹ ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Введ. 07.04.1998. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.

¹⁰ ГОСТ 1983-2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. М.: Стандартинформ, 2016.

¹¹ ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. М.: Стандартинформ, 2016.

¹² Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций: учебник. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990. 575 с.

ратура окружающей среды, интенсивность теплоотвода, инсоляция и т.п.). Для трансформатора напряжения подобные расчеты и вовсе не выполняются. Кроме того, изменение температуры вызывает изменение погрешности преобразования и срока службы изоляции [49–52], которые также обычно не оцениваются в процессе эксплуатации.

Одним из способов получить представление о тепловом состоянии электрооборудования в настоящее время является инфракрасная термография [53–56]. Этот метод основан на регистрации тепловизором ИК-излучения с поверхности электрооборудования. Однако, во-первых, она выполняется периодически, с большим временным интервалом, а во-вторых, позволяет измерять значения температуры только на поверхности, при этом дополнительная погрешность измерения может вноситься неправильной настройкой коэффициента отражения, коэффициента излучения поверхности, внешними погодными условиями (инсоляция, движение воздушных масс, температура и влажность окружающей среды и т.д.). В цифровых трансформаторах напряжения (или комбинированных) дополнительным источником тепла является резистивный делитель, что изменяет картину температурного поля по сравнению с традиционными преобразователями, а в качестве изоляции используются полимерные материалы. Помимо прочего, цифровой трансформатор оснащен электронным блоком, в котором имеется ряд компонентов с интенсивным тепловыделением.

Наличие источника питания в цифровом трансформаторе и оптоволоконной системы передачи информации позволяет создать

систему мониторинга температуры в режиме реального времени. Инструментальные средства, способные дать адекватное значение температуры локально (в том числе и внутри трансформатора) – это датчики температуры. Современные датчики температуры представляют собой комбинированные устройства аналоговой и цифровой техники (см. рис. 2 а), поэтому в наибольшей степени подходят для мониторинга и оценки технического состояния цифровых трансформаторов. Структурная схема такого датчика показана на рис. 2 б).

Таким образом, для своевременного выявления предаварийного состояния цифрового трансформатора необходимо решить следующие задачи:

- определить критические точки конструкции, контроль температуры в которых позволит наиболее точно оценивать техническое состояние и ресурс трансформатора;

- сформулировать подходы к организации мониторинга температуры в критически значимых точках конструкции цифрового измерительного трансформатора в темпе процесса нагрева, разработать алгоритм оценки технического состояния трансформатора на основе данных мониторинга температуры. Для определения диагностических критериев перехода в неработоспособное состояние при перегреве отдельных элементов конструкции трансформатора с учетом воздействия внутренних и внешних факторов были проведены исследования на физических моделях, которые показали правильность и обоснованность принятых решений в части постановки эксперимента и гипотез о процессе нагрева трансформатора [57, 58].

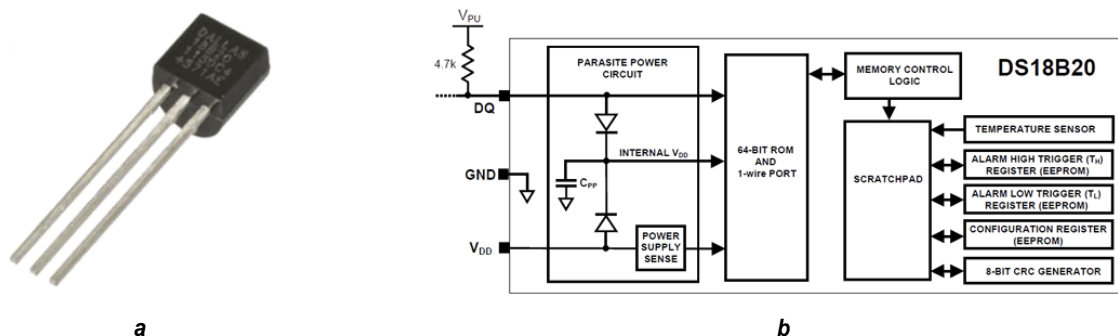


Рис. 2. Внешний вид электронного датчика температуры (а) и его структурная схема (б)
Fig. 2. An image of the electronic temperature sensor (a) and its block diagram (b)

3. Контроль насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока.

Сталь электромагнитных преобразователей тока подвержена насыщению и остаточной намагниченности, которые приводят к искажениям формы сигнала, что в свою очередь увеличивает погрешности преобразования [59, 60]. Насыщение трансформаторов тока и остаточная намагниченность материала магнитопровода опасны, прежде всего, тем, что могут привести к отказам, излишнему или ложному действию релейной защиты [61–63]. В цифровых трансформаторах основным источником сигнала для целей релейной защиты является катушка Роговского, которая не подвержена эффектам насыщения и остаточной намагниченности, а мало-мощный/малогабаритный трансформатор

тока используется для целей коммерческого учета и контроля параметров качества электроэнергии. При отказе катушки Роговского в качестве резервного источника сигнала для релейной защиты может быть использован трансформатор тока. При этом как в нормальном, так и в аварийном режимах может произойти насыщение сердечника трансформатора тока, что приведет к функциональному нарушению работы вторичных систем. Поэтому задача своевременного выявления насыщения и остаточной намагниченности является актуальной. Существует ряд математических методов восстановления сигнала тока при насыщении [64–67], однако в них заложена погрешность, обусловленная отсутствием информации о реальных значениях тока в переходном и установившемся режимах.

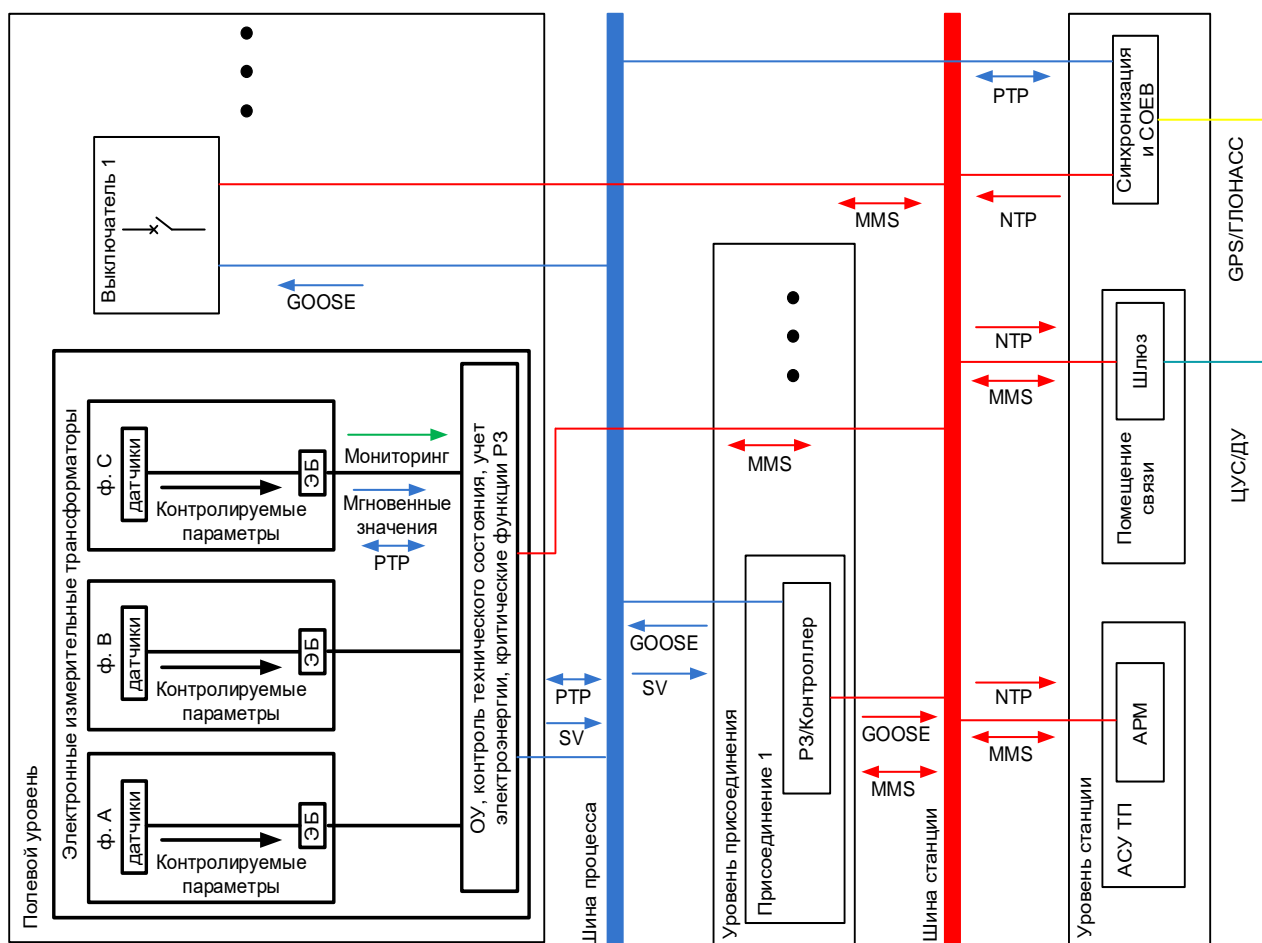


Рис. 3. Функциональная схема стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции
Fig. 3. Functional diagram of a stationary technical condition monitoring system for electronic instrument transformers at a digital substation

Система мониторинга насыщения и остаточной намагниченности построена с учетом предположения, что в качестве эталонного сигнала может использоваться сигнал с катушки Роговского. Сравнение амплитудных спектров вторичного тока трансформатора тока и катушки Роговского покажет наличие таких явлений, как насыщение и остаточная намагниченность. Для определения диагностических признаков и их количественной оценки были проведены исследования явлений на математических моделях и экспериментальных образцах преобразователей, которые показали правильность и обоснованность принятых решений в части постановки эксперимента и гипотез о процессах насыщения и остаточной намагниченности [68, 69].

С учетом подходов к организации систем контроля технического состояния высоковольтного электрооборудования изложенных выше и проведенных исследований предложена следующая функциональная схема стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции (рис. 3).

Рис. 3 отражает концепцию максимальной интеграции различных функций (защиты, измерений, учета электроэнергии, контроля технического состояния) в одном устройстве, выполненном на базе электронного трансформатора, имеющего модульную структуру, что расширяет технические возможности, обеспечивает компактность устройства, снижает удельную стоимость. Кроме того, при комплектном исполнении подобной системы совместно с высоковольтным выключателем

можно добиться универсального решения, позволяющего сократить затраты на кабельную и шкафную продукцию, повысить надежность сети. Данные мониторинга поступают в систему управления надежностью цифровой подстанции. В результате мониторинга формируется информация о состоянии трансформатора и режиме его работы, что позволяет предотвратить аварийные ситуации, связанные с повреждением его элементов или нарушением функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа повреждений высоковольтного оборудования можно сделать вывод о том, что регулярная диагностика снижает аварийность, однако существенного снижения можно добиться благодаря непрерывному мониторингу технического состояния критически важных узлов оборудования. Как показано в работе, успешное массовое внедрение цифровых измерительных трансформаторов может быть достигнуто при использовании мониторинга текущего состояния критически важных параметров, таких как температура токопроводящих элементов и элементов резистивного делителя, остаточная намагниченность сердечника встроенного трансформатора тока, наличие и интенсивность частичных разрядов, качество и уровень напряжения на элементах питания электронных модулей цифрового трансформатора. Такой подход позволяет осуществлять предиктивную аналитику, максимально быстро выявляя неисправности трансформатора еще до окончательного выхода его из строя.

Список источников

1. Wang Yu-duo, Dai Xiao-miao. A Ethernet interface solution based on TCP/IP protocol // IEEE 11th International Conference on Signal Processing. 2012. P. 1521–1525. <https://doi.org/10.1109/ICoSP.2012.6491863>.
2. Zhijian Qu, Mingguang Liu, Zhiling Jiang, Feng Wu, Jing Liu, Lichao Sun. Study of communication gateway based on IEC61850 Protocol // International Conference on Communication Software and Networks. 2009. P. 659–662. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2009.17>.
3. Adamiak M., Baigent D. IEC 61850 Communication networks and systems in substations: an overview for users // The Protection & Control Journal. 2009. P. 61–68.
4. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий. М.: Спектр. 2014. 228 с.
5. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Информационно-измерительная система электросетевой компании. М.: Спектр, 2011. 156 с.
6. Дорофеев И.Н., Серрато А.Э., Чаркин А.В. Реализация системы защиты и управления цифровой подстанции

- на базе программного комплекса iSAS // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. презентаций участников IV Междунар. науч.-техн. конф. РНК Cigre (г. Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г.). Екатеринбург: Российский национальный комитет СИГРЭ, 2013. С. 1–5.
7. Власов М., Иванов А., Кириллов А., Перегудов С., Сердцев А. АСУ с гибкой динамической архитектурой для цифровых подстанций // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 5. С. 92–96.
8. Хренников А., Галиев И., Скрыдлов Е. Цифровые трансформаторы тока. Устройства для вычисления силы тока // Новости электротехники. 2015. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php> (09.01.2023).
9. Янин М.А., Канафеев Р.И., Иванов Н.А., Шеметов А.С., Козырев А.В. Текущие результаты опытной эксплуатации электронных ТТ и ТН 500 кВ // Энергоэксперт. 2020. № 1. С. 62–67.
10. Сержаский В.П., Басмановский М.А. Анализ современного состояния измерительных датчиков тока, их преимущества и недостатки // Modern Science. 2019. № 12-1. С. 613–617.
11. Грабчак Е.П., Байков И.А., Медведева Е.А., Дунаев П.А. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2016 году. Итоги прохождения ОЗП 2016–2017 годов. Задачи на среднесрочную перспективу. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/6575> (09.01.2023).
12. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 7. С. 59–66.
13. Богомолов В.С., Зихерман М.Х., Львов Ю.Н., Назаров И.А., Тимашова Л.В., Шлейфман И.Л. [и др.]. Повреждаемость основного электрооборудования ПС напряжением 110–750 кВ в РФ // Энергия единой сети. 2013. № 2. С. 14–21.
14. Хренников А.Ю., Мажурин Р.В. Диагностика и мероприятия по снижению аварийности высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения в электрических сетях 110–750 кВ // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 52–54.
15. Нечаев Е.В., Яблоков А.А., Лебедев В.Д. Разработка и исследование резистивного делителя напряжения 6–10 кВ // Наука и инновации в технических университетах: матер. IX Всерос. форума студ., асп. и молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 27–30 октября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 31–33.
16. Лылов П.В., Лебедев В.Д., Фомичев А.А. Разработка и исследование системы передачи оцифрованных значений токов и напряжений на подстанции // ЭНЕРГИЯ-2016: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых (г. Иваново, 5–7 апреля 2016 г.). Иваново, 2016. Т. 3. С. 31–33.
17. Лебедев В.Д., Яблоков А.А., Филатова Г.А., Литвинов С.Н., Панащатенко А.В., Готовкина Е.Е. Исследование характеристик и перспективы использования цифровых трансформаторов тока и напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2. С. 22–27.
18. Нечаев Е.В., Шелудько М.В., Яблоков А.А. Исследование характеристик и оптимизация параметров датчика тока цифрового измерительного трансформатора тока // ЭНЕРГИЯ-2017: матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых (г. Иваново, 4–6 апреля 2017 г.). Иваново, 2017. Т. 3. С. 31–33.
19. Загоскин Р.И., Гук А.А. Опыт эксплуатации систем мониторинга высоковольтного оборудования на объектах ПАО "ФСК ЕЭС" // Энергия единой сети. 2016. № 5. С. 48–54.
20. Бояршинов Б.С., Хожайнова Г.И. Процессы старения и разрушения электрической изоляции // Экономика и практический менеджмент в России и за рубежом: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Коломна, 15 апреля 2014 г.). Коломна: Коломенский институт, филиал Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), 2014. С. 225–227.
21. Бояршинов Б.С., Хожайнова Г.И. Экспериментальная проверка теории старения диэлектрической изоляции Журкова-Дмитревского // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 316. № 2. С. 107–109.
22. Cesky L., Janicek F., Kubica J., Skudrik F. Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers // 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 2017. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967359>.
23. Ахмедова О.О., Грачева М.Н., Кирюхина Е.И. Современное развитие измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики в энергетике // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 5. С. 47–51.
24. Славутский А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 122–130.
25. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Моделирование переходных процессов в электрической стали, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 2. С. 37–48.
26. Андреев Д.В., Столяров А.А., Андреев В.В., Царьков А.В. Исследование необратимых процессов деградации подзатворного диэлектрика структур металл-диэлектрик-полупроводник // Необратимые процессы в природе и технике: тр. X Всерос. конф. (г. Москва, 29–31 января 2019 г.). М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2019. С. 114–117.
27. Raetzke S., Koch M., Anglhuber M. Modern insulation condition assessment for instrument transformers // IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (Bali, 23–27 September 2012). Bali: IEEE, 2012.

P. 52–55. <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416177>.

28. Wu Yan, Hu Yi-Fan, He Ri, Jiao Chong-Qing. Measurement and analysis of electromagnetic disturbance at the secondary side of electronic voltage transformer due to switching operations via a 6 kv switchgear // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2017. <https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260347>.
29. Suttner C., Tenbohlen S., Ebbinghaus W. Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256159>.
30. Найденов А.Д. Оптические трансформаторы тока // Вестник науки и образования. 2020. № 8-1. С. 19–23.
31. Морозов А.Н., Степанов А.А., Малахов С.В., Иванов В.В. Разработка и опытная эксплуатация полностью оптического трехфазного трансформатора напряжения 220 кВ с цифровым выходом // Электрические станции. 2020. № 2. С. 28–36. <http://doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.005>.
32. Топольский Д.В., Топольская И.Г. Система автоматизации цифровой подстанции // Наука ЮУрГУ: матер. 71-й науч. конф. (г. Челябинск, 10–12 апреля 2019 г.). Челябинск: ЮУрГУ, 2019. С. 259–265.
33. Моржин Ю.И., Попов С.Г., Румянцев А.А., Ильин М.Д. Опытный полигон ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - первая в России «Цифровая подстанция», использующая стандарт IEC 61850. Testing-field of "R&D FGC UES" – "Digital Substation" // Энергия единой сети. 2014. № 3. С. 16–25.
34. Курьянов В.Н., Куш Л.Р., Горбунова Н.Р., Бондарев И.В., Цыпик В.В. Цифровые подстанции. Опыт реализации // Наука, образование и культура. 2018. № 3. С. 9–12.
35. Вершинин Ю.Н. Механизм электронного пробоя твердых диэлектриков (эволюция представлений) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2003. № 2. С. 152–157.
36. Зарубин В.С., Савельева И.Ю., Станкевич И.В. Температурное состояние плоского слоя полимерного диэлектрика с зависящей от температуры теплопроводностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2018. № 4. С. 14–23. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>.
37. Гефле О.С., Черкашина Е.И. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. № 1. С. 54–59.
38. Собчук Н.В., Слободянюк Е.В. Определение оптимальной величины испытательного напряжения для эффективного контроля изоляции // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 70–74.
39. Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1073–1085.
40. Лисина Л.Ф. Методы испытания и диагностики изоляции высоковольтного оборудования // Вестник Ангарской государственной технической академии. 2014. № 8. С. 61–65.
41. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
42. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1980. 112 с.
43. Балобанов Р.Н., Зацаринная Ю.Н. Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 2. № 18. С. 257–258.
44. Агафонов Г.Е., Бабкин И.В., Берлин Б.Е. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией: монография. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 728 с.
45. Khalyasmaa A., Stepanova A., Eroshenko S., Bolgov V., Duc Chung T. The application of partial discharge monitoring system for instrument transformers: special issues // 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/SIELA49118.2020.9167108>.
46. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
47. Овсянников А.Г., Марюшко Е.А. Разработка рекомендаций по проведению оперативной диагностики частичных разрядов в комплектных элегазовых распределительных устройствах // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иваново, 9–13 ноября 2015 г.). Иваново, 2015. Т. 1. С. 536–539.
48. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Литвинов С.Н., Словесный С.А., Яблоков А.А. Экспериментальное определение частичных разрядов в макете цифрового измерительного трансформатора дифференциальным методом // Вестник ИГЭУ. 2019. Вып. 2. С. 32–42.
49. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Vol. 9. Iss. 5. P. 763–808. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663>.
50. Robalino Vanegas D.M., Mahajan S.M. Effects of thermal accelerated ageing on a medium voltage oil-immersed current transformer // Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Vancouver, 9–12 June 2008). Vancouver: IEEE, 2008. P. 470–473. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570375>.
51. Gupta B.K., Densley J., Narang A. Diagnostic practices used for instrument transformers // Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Vancouver, 9–12 June 2008). Vancouver: IEEE, 2008. P. 239–242. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570319>.
52. Ruijin Liao, Chao Tang, Lijun Yang, Huanchao Chen. Thermal aging studies on cellulose insulation paper of power

- transformer using AFM // IEEE 8th International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials (Bali, 26–30 June 2006). Bali: IEEE, 2006. P. 722–725. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284279>.
53. Елтышев Д.К., Хорошев Н.И. Диагностика силового маслонаполненного трансформаторного оборудования тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 32–40.
54. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal measurement and its application for diagnostics of distribution oil transformers // Энергетика. Известия высших учебных и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 6. С. 583–594. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>.
55. Dan-yi Chi, Fucun Huang, Dong-peng Sui, Li-na Geng, Dan Zhao. The analysis of overheat failure for 220 kV voltage transformer with live detection // The Journal of Engineering. 2019. Vol. 2019. Iss. 16. P. 2058–2059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/joe.2018.8825>.
56. Ciric R.M., Milkov M. Application of thermal imaging in assessment of equipment in power plants // Monitoring Expertise and Safety Engineering. 2014. Vol. 4. Iss. 2. P. 1–9.
57. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Shuvalov S. Thermal and aerodynamic tests of a digital combined current and voltage transformer // 22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy - IManE&E: MATEC Web Conference. 2018. Vol. 178. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809006>.
58. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Makhsumov I. Physical simulation of heat exchange between 6(10) kV voltage instrument transformer and its environment with natural convection and insulation // Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment: MATEC Web Conference. Tomsk. 2018. Vol. 194. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401035>.
59. Кузнецов С.Л., Дегтярев А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 3. С. 29–31.
60. Сивков А.С., Щеглов Л.В., Ведерников Г.А., Петрова О.В. Дополнительные параметры трансформаторов тока для обеспечения надежной работы сети // Энергоэксперт. 2018. № 3. С. 44–47.
61. Кузнецов С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Петров А.А., Костарев Л.Н. [и др.]. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе // Релейная защита. 2019. № 1. С. 28–36.
62. Воробьев В.С. О неправильной работе устройств РЗА в переходных режимах при насыщении трансформаторов тока // Заседание некоммерческого партнерства «Научно-технический совет единой энергетической системы» (г. Москва, 11 сентября 2015 г.). М., 2015. С. 12–43.
63. Дони Н.А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ // Релейщик. 2015. № 4. С. 30–33.
64. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. ст. Чебоксары: СРЗАУ, 2012. Вып. I. 120 с.
65. Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Тащилин В.А., Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2. С. 11–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18).
66. Дони Н.А., Иванов И.Ю., Иванова В.Р. Моделирование дифференциальной защиты линий электропередачи, работающей на базе векторных значений токов // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 1. С. 14–17.
67. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания // Электричество. 2012. № 4. С. 9–13.
68. Яблоков А.А., Евдаков А.Е., Готовкина Е.Е. Экспериментальное исследование алгоритма мониторинга насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): матер. Междунар. (XX Всероссийской) науч.-техн. конф. (г. Иваново, 29–31 мая 2019 г.). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. С. 307–309.
69. Пат. 2674580, Российская Федерация, G01R 33/12 (2006.01). Способ определения насыщения магнитопровода трансформатора тока / В.Д. Лебедев, А.Е. Евдаков, С.Н. Литвинов, А.В. Гусенков; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет. Заявл. 27.12.2017; опубл. 11.12.2018. Бюл. № 35.

References

1. Wang Yu-duo, Dai Xiao-miao. A Ethernet interface solution based on TCP/IP protocol. In: *IEEE 11th International Conference on Signal Processing*. 2012;1521-1525. <https://doi.org/10.1109/ICoSP.2012.6491863>.
2. Zhijian Qu, Mingguang Liu, Zhiling Jiang, Feng Wu, Jing Liu, Lichao Sun. Study of communication gateway based on IEC61850 Protocol. In: *International Conference on Communication Software and Networks*. 2009;659-662. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2009.17>.
3. Adamiak M., Baigent D. IEC 61850 Communication networks and systems in substations: an overview for users. *The Protection & Control Journal*. 2009;61-68.
4. Chichev S.I., Kalinin V.F., Glinkin E.I. *Designing methodology of a digital sub-station based on new technologies*.

Moscow: Spektr; 2014, 228 p. (In Russ.).

5. Chichev S.I., Kalinin V.F., Glinkin E.I. *Information and measuring system of the electric grid company*. Moscow: Spektr; 2011, 156 p. (In Russ.).

6. Dorofeev I.N., Serrato A.E., Charkin A.V. Implementation of the protection and monitoring system of a digital substation based on the iSAS software package. *Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem: sb. prezentacij uchastnikov IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii RNK Cigre = Modern development trends of power grid relay protection systems and automation: Collected presentations of the participants of the 4th International scientific and technical conference. RNC Cigre*. 3–7 June 2013, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Rossijskij nacional'nyj komitet SIGRE; 2013, p. 1-5. (In Russ.).

7. Vlasov M., Ivanov A., Kirillov A., Peregodov S., Serdtsev A. ACS with flexible dynamic architecture for digital substations. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2012;5:92-96. (In Russ.).

8. Khrennikov A., Galiev I., Skrydlov E. Digital current transformers. Devices for current strength calculation. *Novosti elektrotehniki*. 2015;6. Available from: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php> [Accessed 9th January 2023].

9. Yanin M.A., Kanafeev R.I., Ivanov N.A., Shemetov A.S., Kozyrev A.V. Current results of pilot operation of electronic 500 kV CTs and VTs. *Energoekspert*. 2020;1:62-67. (In Russ.).

10. Serzhaskii V.P., Basmanovskii M.A. Analysis of the current state of measuring current sensors, their advantages and disadvantages. *Modern Science*. 2019;12-1:613-617. (In Russ.).

11. Grabchak E.P., Bajkov I.A., Medvedeva E.A., Dunaev P.A. The main results of electric power facilities operation in 2016. The results of the autumn-winter period 2016–2017. Medium term tasks. 2017. Available from: <https://minenergo.gov.ru/node/6575> [Accessed 9th January 2023]. (In Russ.).

12. Sayenko Y.L., Popov A.S. Investigation of the damage cause of the voltage transformers using for insulation checking. *Energobezbezhenie. Energetika. Energoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2011;7:59-66. (In Russ.).

13. Bogomolov V.S., Zikherman M.Kh., L'vov Yu.N., Nazarov I.A., Timashova L.V., Shleifman I.L., et al. Damageability of the main electrical equipment of 110-750 kV substations in the Russian Federation. *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2013;2:14-21. (In Russ.).

14. Khrennikov A.Yu., Mazhurin R.V. Diagnostics and measures to reduce the accident rate of high-voltage current and voltage measuring transformers in electrical networks 110-750 kV. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2013;1:52-54. (In Russ.).

15. Nechaev E.V., Yablokov A.A., Lebedev V.D. Development and research of a 6-10 kV resistive voltage divider. In: *Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: materialy Devyatogo Vserossiiskogo foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Science and innovations in technical universities: materials of the Ninth All-Russian Forum of students, graduate students and young scientists*. 27–30 October 2015, St. Petersburg. St. Petersburg; 2015, p. 31-33. (In Russ.).

16. Lylov P.V., Lebedev V.D., Fomichev A.A. Development and research of a system for transmitting digitized values of currents and voltages at a substation. In: *ENERGIYA-2016: materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Energy – 2016: materials of the 11th International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists*. 5–7 April 2016, Ivanovo. Ivanovo; 2016, vol. 3, p. 31-33. (In Russ.).

17. Lebedev V.D., Yablokov A.A., Filatova G.A., Litvinov S.N., Panashchatenko A.V., Gotovkina E.E. Study of the characteristics and application prospects of digital current and voltage transformers. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2018;2:22-27. (In Russ.).

18. Nechaev E.V., Shelud'ko M.V., Yablokov A.A. Study of the characteristics and optimization of the parameters of the current sensor of a digital measuring current transformer. In: *Energiya-2017: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Energy-2017: materials of the 12th International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists*. 4–6 April 2017, Ivanovo. Ivanovo; 2017, vol. 3, p. 31-33. (In Russ.).

19. Zagoskin R.I., Guk A.A. Operating experience of monitoring systems for high-voltage equipment at the facilities of the Federal Grid Company of the Unified Energy System (PAO "FSK EES"). *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2016;5:48-54. (In Russ.).

20. Boyarshinov B.S., Khozhainova G.I. Aging and destruction of electrical insulation. In: *Ekonomika i prakticheskii menedzhment v Rossii i za rubezhom: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii = Economics and practical management in Russia and abroad: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 15 April 2014, Kolomna. Kolomna: Kolomna Institute, branch of the Moscow State Engineering University (MAMI); p. 225-227. (In Russ.).

21. Boyarshinov B.S., Khozhainova G.I. Experimental verification of Zhurkov-Dmitrevsky theory of dielectric insulation aging. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2010;316(2):107-109. (In Russ.).

22. Cesky L., Janicek F., Kubica J., Skudrik F. Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers.

- In: *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967359>.
23. Akhmedova O.O., Gracheva M.N., Kiryuhina E.I. The modern development of the measuring current transformers for relay protection and automation in the energy sector. *Energoi resursosberezhenie: Promyshlennost' u transport = Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016;5:47-51. (In Russ.).
24. Slavutskiy A. Accounting the residual magnetization in the transformer for the modeling of transients. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2015;1:122-130. (In Russ.).
25. Evdokunin G.A., Dmitriev M.V. Transients modeling in electrical steel containing transformers when taking into account their magnetic system configuration. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2009;2:37-48. (In Russ.).
26. Andreev D.V., Stolyarov A.A., Andreev V.V., Car'kov A.V. Study of irreversible degradation processes of the gate dielectric of metal-dielectric-semiconductor structures. *Neobratimye processy v prirode i tekhnike: trudy X Vserossijskoj konferencii (gorod, chislo, mesyac provedeniya) = Irreversible processes in nature and technical equipment: proceeding of the 10th All-Russian conference*. 29-31 January 2019, Moscow. Moscow: Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 2019, p. 114-117. (In Russ.).
27. Raetzke S., Koch M., Anglhuber M. Modern insulation condition assessment for instrument transformers. In: *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 23-27 September 2012, Bali. Bali: IEEE; 2012, p. 52-55. <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416177>.
28. Wu Yan, Hu Yi-Fan, He Ri, Jiao Chong-Qing. Measurement and analysis of electromagnetic disturbance at the secondary side of electronic voltage transformer due to switching operations via a 6 kV switchgear. In: *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260347>.
29. Suttner C., Tenbohlen S., Ebbinghaus W. Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256159>.
30. Najdenov A.D. Optical current transformers. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020;8-1:19-23. (In Russ.).
31. Morozov A.N., Stepanov A.A., Malahov S.V., Ivanov V.V. Development and pilot operation of a fully optical three-phase voltage transformer 220 kV with a digital output. *Elektricheskie stancii*. 2020;2:28-36. <http://doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.005>. (In Russ.).
32. Topol'skij D.V., Topol'skaya I.G. *Digital substation automation system. Nauka YuUrGU: materialy 71-j nauchnoj konferencii = Science of the South Ural State University: materials of the 71st scientific conference*. 10-12 April 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: South Ural State University; 2019, p. 259-265. (In Russ.).
33. Morzhin Yu.I., Popov S.G., Rumyantsev A.A., Il'in M.D. Testing-field of "R&D FGC UES" – "Digital Substation". *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2014.3:16-25. (In Russ.).
34. Kur'yanov V.N., Kushch L.R., Gorbunova N.R., Bondarev I.V., Cypik V.V. Digital substations. Implementation experience. *Nauka, obrazovanie i kul'tura*. 2018;3:9-12. (In Russ.).
35. Vershinin Yu.N. Mechanism of electronic breakdown of solid dielectrics (evolution of ideas). *Izvestiya rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. No 2, 2003. pp. 152-157. (In Russ.).
36. Zarubin V.S., Savelyeva I.Yu., Stankevich I.V. The temperature state of a plane polymer dielectric layer with temperature-dependent heat conduction. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki*. 2018;4:14-23. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>. (In Russ.).
37. Gefle O.S., Cherkashina E.I. Thermal effect-based trouble-shooting of the pre-breakdown state of polymeric dielectrics. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2005;308(1):54-59. (In Russ.).
38. Sobchuk N.V., Slobodyanyuk E.V. Determining the optimal value of the test voltage for effective insulation control. *Nauchnye trudy Vinnickogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016;2:70-74. (In Russ.).
39. Saushev A.V., Sherstnev D.A., Shirokov N.V. Analysis of the trouble-shooting methods for high-voltage devices. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2017;9(5):1073-1085. (In Russ.).
40. Lisina L.F. Methods of testing and diagnostics of high-voltage equipment insulation. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoj tekhnicheskoi akademii*. 2014;8:61-65. (In Russ.).
41. Svi P.M. *Methods and means of high voltage equipment diagnostics*. Moscow: Energoatomizdat; 1992, 240 p. (In Russ.).
42. Svi P.M. *Insulation control of high voltage equipment*. Moscow: Energy; 1980, 112 p. (In Russ.).
43. Balobanov R.N., Zacarinaya Yu.N. Features of trouble-shooting of high-voltage equipment with SF6 insulation. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015;2(18):257-258. (In Russ.).
44. Agafonov G.E., Babkin I.V., Berlin B.E. *Electrical devices of high voltage with SF6 insulation*. St. Petersburg: Energoatomizdat; 2002, 728 p. (In Russ.).
45. Khalyasmaa A., Stepanova A., Eroshenko S., Bolgov V., Duc Chung T. The application of partial discharge monitoring system for instrument transformers: special issues. In: *21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/SIELA49118.2020.9167108>.

46. Kuchinskii G.S. *Partial discharges in high-voltage structures*. Leningrad: Energy. Leningrad. Energiya; 1979, 224 p. (In Russ.).
47. Ovsyannikov A.G., Maryushko E.A. Development of recommendations for rapid diagnosis of partial discharges in gas insulated switchgear. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Electrical engineering through the eyes of youth: proceedings of the 6th International scientific and technical conference*. 9–13 November 2015, Ivanovo. Ivanovo; 2015, vol. 1, p. 536-539. (In Russ.).
48. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Litvinov S.N., Slovesny S.A., Yablokov A.A. Experimental determination of partial discharges in a model of a digital instrument transformer by differential method. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019;2:32-42. (In Russ.).
49. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2002;9(5):763-808. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663>.
50. Robalino Vanegas D.M., Mahajan S.M. Effects of thermal accelerated ageing on a medium voltage oil-immersed current transformer. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 9–12 June 2008, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2008, p. 470-473. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570375>.
51. Gupta B.K., Densley J., Narang A. Diagnostic practices used for instrument transformers. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 9–12 June 2008, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2008, p. 239-242. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570319>.
52. Ruijin Liao, Chao Tang, Lijun Yang, Huanchao Chen. Thermal aging studies on cellulose insulation paper of power transformer using AFM. In: *IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*. 26–30 June 2006, Bali. Bali: IEEE; 2006, p. 722–725. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284279>.
53. Eltyshv D.K., Horoshev N.I. Diagnostics of the power oil-filled transformer equipment of thermal power plants. *Teploenergetika*. 2016;8:32-40. (In Russ.).
54. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal measurement and its application for diagnostics of distribution oil transformers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh objedinennij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>.
55. Dan-yi Chi, Fucun Huang, Dong-peng Sui, Li-na Geng, Dan Zhao. The analysis of overheat failure for 220 kV voltage transformer with live detection. *The Journal of Engineering*. 2019;2019(16):2058-2059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/joe.2018.8825>.
56. Ciric R.M., Milkov M. Application of thermal imaging in assessment of equipment in power plants. *Monitoring Expertise and Safety Engineering*. 2014;4(2):1-9.
57. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Shuvalov S. Thermal and aerodynamic tests of a digital combined current and voltage transformer. In: *22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy – IManE&E: MATEC Web Conference*. 2018;178. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809006>.
58. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Makhsumov I. Physical simulation of heat exchange between 6(10) kV voltage instrument transformer and its environment with natural convection and insolation. In: *Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment: MATEC Web Conference*. Tomsk. 2018;194. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401035>.
59. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A. On the recovery of the primary current periodic component of the current transformer in the transient mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika*. 2011;3:29-31. (In Russ.).
60. Sivkov A.S., Shcheglov L.V., Vedernikov G.A., Petrova O.V. Additional parameters of current transformers to ensure reliable operation of the network. *Energoekspert*. 2018;3:44-47. (In Russ.).
61. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A., Petrov A.A., Kostarev L.N., et al. Analysis of non-selective actions of busbar differential protection at external single-phase short circuits with saturation of current transformer in a healthy phase. *Relejnaya zashchita*. 2019;1:28-36. (In Russ.).
62. Vorob'ev V.S. On incorrect operation of relay protection and automation devices in transient modes with saturated current transformers. In: *Zasedanie nekommercheskogo partnerstva "Nauchno-tehnicheskij sovet edinoj energeticheskoy sistemy" = Meeting of the non-profit partnership "Scientific and Technical Council of the Unified Energy System"*. 11 September 2015, Moscow. Moscow; 2015, p. 12-43. (In Russ.).
63. Doni N.A. Possibility of non-selective action of high-speed distance protection under external damage with high short-circuit currents. *Relejschik*. 2015;4:30-33. (In Russ.).
64. Rybalkin A.D., Shurupov A.A., Ermolkin I.A. Prediction of the short-circuit current under current transformer magnetic circuit saturation. In: *Cifrovaya elektrotehnika: problemy i dostizheniya: sbornik nauchnykh statej = Digital Electrical Engineering: Problems and Achievements: collected scientific articles*. Cheboksary: SRZAU; 2012, iss. I, 120 p. (In Russ.).
65. Odinaev I.N., Murzin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A., Shukalo A. Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 2020;2:11-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18). (In Russ.).
66. Doni N.A., Ivanov I.Yu., Ivanova V.R. Simulation line differential protection operating on the basis of vector values current. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2014;1:14-17. (In Russ.).
67. Lyamets Yu.Ya., Romanov Yu.V., Shirokin M.Yu. Fast estimation of the periodic component of the short circuit cur-

rent. *Elektrichestvo*. 2012;4:9-13. (In Russ.).

68. Yablokov A.A., Evdakov A.E., Gotovkina E.E. Experimental verification algorithm for monitoring saturation and the residual magnetization of current transformer magnetic core. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (Bernardosovskie chteniya): materialy Mezhdunarodnoj (HH Vserossijskoj) nauchno-tekhnicheskoy konferencii = State and development prospects of electrical and thermal technology (Bernardosovskie readings): materials of the International (20th All-Russian) scientific and technical conference*. 29–31 May 2019, Ivanovo. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin; 2019, p. 307-309. (In Russ.).

69. Lebedev V.D., Evdakov A.E., Litvinov S.N., Gusenkov A.V. *Method to determine magnetic circuit saturation of a current transformer*. Patent RF, no. 2674580; 2017. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Литвинов Сергей Николаевич,

старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия
✉ litvinov.sn@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0618-2621>

Лебедев Владимир Дмитриевич,

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия
vd_lebedev@mail.ru

Гусенков Алексей Васильевич

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия
avgus@ispu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2023; принята к публикации 27.03.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey N. Litvinov,

Senior Lecturer of the Department of Power stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia
✉ litvinov.sn@yandex.ru

Vladimir D. Lebedev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia
vd_lebedev@mail.ru

Aleksey V. Gusenkov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Power stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia
avgus@ispu.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 18.01.2023; approved after reviewing 21.02.2023; accepted for publication 27.03.2023.