



Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования



Айбек Жомартович Еркебаев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия / Алматы, Казахстан.

✉ erkebaev7397-1@murdoch.in

Айбек ЕРКЕБАЕВ

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования обуславливается необходимостью разработки и последовательного внедрения эффективных методик контроля текущего технического состояния силовых трансформаторных подстанций в системе железных дорог Республики Казахстан. Основу методологического подхода в данной научно-исследовательской работе составляет сочетание методов системного анализа существующих на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования с аналитическим исследованием принципиальных возможностей осуществления данных операций в системе железных дорог Республики Казахстан.

В ходе проведения экспериментальной части исследования высокую эффективность в вопросах обнаружения частичных разрядов на поверхности изоляционного слоя оборудования силовых трансформаторных подстанций показали акустические датчики частичных разрядов. Данное оборудование при использовании метода акустического контроля продемонстрировало высокие эксплуатационные характеристики.

Хорошие результаты показал и акустический метод контроля в целом, так как оперативность контроля и возможность снятия показаний при условии сохранения непрерывной подачи силового напряжения позволяют сократить время проведения эксперимента с получением высокоточных результатов, определять причины возникновения нарушений на поверхности изоляционного слоя силовых трансформаторов, а также дают возможность максимально точной локализации участков возникновения подобных повреждений.

Высказан ряд предложений по роли, которую акустический метод контроля может играть в общей системе организации проверки технического состояния, эксплуатации и ремонта силового электрооборудования.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии разнообразных вариантов применения методов акустического диагностирования, а также подтверждают необходимость их последующего усовершенствования для достижения высокого качества контроля технического состояния и функционирования силовых трансформаторных подстанций железных дорог.

Ключевые слова: силовые трансформаторные подстанции, тяга поездов, подвижной состав железной дороги, акустическое диагностирование, железнодорожная отрасль Республики Казахстан, контроль технического состояния.

Для цитирования: Еркебаев А. Ж. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 1 (98). С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.



ВВЕДЕНИЕ

Современные трансформаторные станции имеют важное значение для обеспечения тяги поездов в системе электрифицированных железных дорог, для безопасного эксплуатационного использования электроэнергетического оборудования. Этот вопрос является актуальным, в том числе и для системы железнодорожного транспорта Республики Казахстан.

К числу наиболее распространённых и эффективных в практическом использовании методов контроля технического состояния силовых трансформаторов относится метод акустического диагностирования, предполагающий локацию и точечное определение уровня распределяемых звуковых разрядов. Таковыми называются разряды, шунтирующие только определённый участок изоляционного покрытия силового трансформатора, они свидетельствуют о наличии локальных дефектов, требующих своевременного устранения. Это могут быть ослабления изоляционного покрытия по причине образования газовых полостей, а также возникновения острых кромок металлических конструкций [1]. Включения газа являются ослабленными участками, вне зависимости от консистенции изоляционного покрытия (твёрдое или жидкое), ослабление которых происходит по причине несоответствия показателей диэлектрической проницаемости газа, а также высоких показателей напряжённости электрического поля, имеющих место во включениях и в несколько раз превышающих аналогичные значения в других точках изоляционного покрытия. Также следует принимать во внимание тот факт, что показатель электрической плотности газа существенно меньше, чем аналогичный показатель твёрдых и жидких диэлектриков. Возникновение описываемых частичных разрядов возможно также в непосредственной близости от острых краёв электродов, в областях, где существенно возрастает напряжённость электрического поля [2].

Необходимость осуществления своевременного контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования во многом обуславливается частыми повреждениями изоляционного покрытия силовых трансформаторов, происходящих по причине частых разрядов в масляных прослойках, пребывающих в непо-

средственном контакте с твёрдой изоляцией. В подобных ситуациях на поверхности твёрдого изоляционного покрытия появляются устойчивые проводящие следы. На подобных участках по причине возникновения избыточных перенапряжений, а также рабочих напряжений, возможно возникновение разрядов поверхностного типа, развитие которых происходит непрерывно и завершается пробоем изоляционного покрытия [3]. Это свидетельствует о значительной опасности, которую несут в себе частичные разряды для изоляции силовых трансформаторов, по причине высокой вероятности разрушения изоляционного покрытия на отдельных участках и развития пробоев промежутков изоляции.

Технический персонал, в чьи непосредственные служебные обязанности входит обслуживание силовых трансформаторных подстанций, вынужден непосредственно сталкиваться с проблемами возникновения пробоев изоляционного покрытия, а также появления частичных разрядов в изоляционном слое при высоких и сверхвысоких значениях напряжения на линиях подстанций. Этим объясняется необходимость своевременного и качественного осуществления контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования в целях предупреждения пробоев изоляции и обеспечения бесперебойного функционирования силовых трансформаторных подстанций [4].

Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость проведения исследований, основными задачами которых являются: оценка технического состояния современных силовых трансформаторных подстанций, которые используются в системе железнодорожного транспорта Республики Казахстан, с акцентом на определение текущих проблем технического состояния маслonaполненного оборудования, выполняемого при проведении мониторинга частичных разрядов; разработка и внедрение методик акустических измерений, предназначенных для диагностики и анализа частичных разрядов на изоляционном покрытии трансформаторных подстанций, а также определения конкретного месторасположения дефектов трансформаторной изоляции; проведение научных экспериментов, направленных на изучение имеющихся методик диагностики суще-

ствующего оборудования силовых трансформаторных подстанций.

Проблемой существующих исследований вопросов осуществления контроля текущего технического состояния трансформаторных подстанций является отсутствие подробных и достоверных, проверенных практическим путём научных разработок использования методик акустического диагностирования технического состояния силовых трансформаторов [5]. Данная работа *предполагает* по возможности восполнить определённый пробел в изучении тематики использования методик акустического диагностирования для решения проблемных вопросов, связанных с контролем технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций. В ходе исследования использовалась информация, полученная экспериментальным путём, при проведении конкретных научных экспериментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основу методологии исследования составляет сочетание *методов* системного анализа существующих на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования с аналитическим исследованием принципиальных возможностей осуществления данных операций в системе железных дорог Республики Казахстан.

Теоретической базой данной научно-исследовательской работы выступают доступные публикации отечественных и зарубежных исследователей, посвящённые разнообразным теоретическим аспектам разработки принципов и создания методик контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования.

При проведении исследования была установлена следующая очерёдность этапов выполняемых работ.

На первом этапе было предпринято теоретическое исследование доступных научных публикаций, посвящённых исследованиям понятия акустического диагностирования, а также контроля технического состояния силовых трансформаторов с использованием данных методик. Теоретическое исследование предвзяло системный анализ существующих

на сегодняшний день подходов к осуществлению контроля текущего технического состояния силовых трансформаторов с использованием технологии акустического диагностирования, который также был последовательно выполнен на данном этапе научно-исследовательской работы.

На следующем этапе было проведено аналитическое исследование особенностей осуществления контроля технического состояния силовых подстанций методом акустического диагностирования в системе железных дорог Республики Казахстан. Кроме того, на данном этапе научно-исследовательской работы было проведено аналитическое сравнение полученных предварительных результатов с итоговыми результатами исследований других учёных, также занимавшихся изучением возможностей проведения контроля технического состояния оборудования трансформаторных подстанций посредством практического применения метода акустического диагностирования. Это обеспечило достаточно объективное восприятие полученных результатов в контексте их последующего практического применения для решения конкретных задач, возникающих в процессе эксплуатации трансформаторных подстанций в сфере железнодорожного хозяйства отдельно взятого государства.

На заключительном этапе исследования на основании полученных ранее результатов были сформулированы окончательные выводы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения задач исследования были проведены опытно-экспериментальные исследования, предполагающие размещение датчиков акустического типа на нескольких трансформаторах, использованных в качестве их объекта. Использовались датчики акустических разрядов «AC-Sensor», предназначенные для контактной регистрации импульсов частичных разрядов на поверхности изоляции и силового оборудования трансформаторных подстанций.

Методика предполагала соблюдение следующей последовательности выполнения опытно-экспериментального исследования:

1. К прибору, фиксирующему уровень частичных разрядов на поверхности изоляционного слоя силового трансформатора, при-



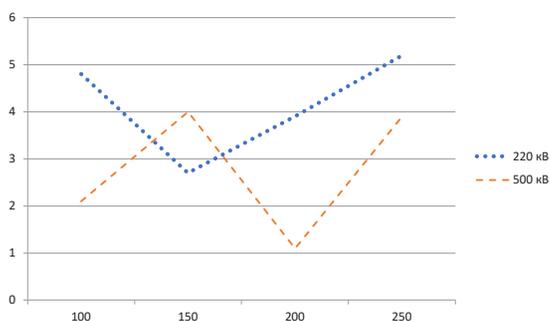


Рис. 1. Зависимость импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя [выполнено автором].

Таблица 1

Данные распределения обнаруженных в ходе эксперимента повреждений изоляционного слоя силовых трансформаторов по классам напряжений [выполнено автором]

Класс напряжений	110 кВ	150 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ	1100 кВ
Повреждения	42	28	34	15	6	1	5

соединяется акустический датчик «AC-Sensor», позволяющий фиксировать возникновение в системе частичных разрядов, а также характерных акустических импульсов. В том случае, если удастся обнаружить область частичных разрядов, несколько акустических датчиков указанного типа располагаются последовательно на строго определённом расстоянии друг от друга. Полученные акустические сигналы регистрируются, и на основании полученных данных выстраивается чёткая последовательность.

2. Экспериментально определяется максимально допустимое пороговое значение акустического сигнала, которое может быть применено для последующих исследований.

3. Выстраиваются пороговые значения настроек непосредственно в областях обнаружения частичных разрядов, а также параметры помех, возникающих в случае превышения уровнем сигнала заданного порогового значения. Все указанные величины определяются типом трансформаторов и рассчитываются непосредственно в ходе проведения эксперимента исходя из конкретных исходных данных.

4. Все измерения были выполнены в течение предварительно обозначенного промежутка времени.

Было проведено распределение обнаруженных повреждений изоляционного слоя силовых трансформаторов непосредственно по классам напряжений, характерным для трансформаторов определённого класса.

Данные, полученные в ходе указанного распределения, представлены в табл. 1.

По результатам, полученным в ходе исследований с использованием акустических датчиков «AC-Sensor», построена графическая зависимость импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя. Данные представлены для двух трансформаторов с различными классами напряжений: 220 кВ и 500 кВ. Графическая зависимость указанного рода представлена на рис. 1.

Как видно из данных, представленных на рис. 1, равномерное нарастание зависимости рассматриваемых показателей имеет место в случае практического применения силовых трансформаторов с классом напряжений не ниже 500 кВ. При использовании силовых трансформаторов с параметрами классов напряжений других типов практически отсутствует планомерное развитие зависимости импульсов частичных разрядов от акустических импульсов, возникающих при размещении датчиков на поверхности изоляционного слоя, что может в ряде случаев свидетельствовать о высокой вероятности возникновения пробоев изоляционного слоя силового трансформатора и создания аварийной ситуации [6]. Кроме того, налицо значительные перепады зависимости исследуемых параметров в ряде случаев, что может свидетельствовать о нарушениях эксплуатационного использования силовых трансформа-



Рис. 2. Методы контроля частичных разрядов и их обнаружения [составлено автором].

торов и проблемах с качеством материала изоляционного слоя, что крайне негативно сказывается на общем состоянии силовых трансформаторных подстанций в контексте перспектив их практического использования в будущем в системе железнодорожного транспорта Казахстана.

Методы обнаружения частичных разрядов и их измерения являются основополагающими с точки зрения изучения перспектив контроля технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций. На рис. 2. отображены основные методы контроля частичных разрядов и их обнаружения в контексте перспектив их использования для проведения контроля технического состояния силовых железнодорожных подстанций. Акустические методы контроля, представленные на данной схеме, являются основными в контексте данного исследования и представляют собой наибольшую перспективу с точки зрения возможностей осуществления качественного контроля технического состояния силовых трансформаторов без прерывания их работы и отключения для выполнения необходимых исследований.

Акустические методы обнаружения частичных разрядов предполагают поиск и последовательное обнаружение, а также измерение величин колебаний, вызванных частичными разрядами. Высокая частота подобных звуковых колебаний может быть определена исключительно с использованием специальной регистрирующей аппаратуры. Кроме того, определяются время и место возникновения подобного разряда, а также его мощность. В последующем применение специальной аппаратуры для регистрации перепадов амплитуды звуковых колебаний может иметь существенное значение для получения результатов высокой точности, отражающих реальные возможности применения акустических методов обнаружения частичных разрядов.

При практическом использовании каждого метода предполагается применение датчи-

ков разного рода, которые используют в своей основе принципы преобразования акустических и электромагнитных колебаний в некотором диапазоне частот: сверхвысокочастотные, высокочастотные, среднечастотные и низкочастотные. Диапазон указанных датчиков может существенно различаться в зависимости от типа трансформаторного оборудования и особенностей его изоляционного слоя. Также при выборе метода и типа измерения необходимо принимать во внимание решаемые задачи и параметры электроэнергетической трансформаторной установки объекта железнодорожного транспорта. Для определения параметров частотных разрядов на небольших расстояниях высокую эффективность демонстрируют датчики сверхвысоких частот. К тому же они весьма компактны и могут быть легко размещены во внутреннем пространстве энергетических установок, таких, как статор электрического двигателя.

Особое внимание при регистрации частичных разрядов в изоляционном покрытии силовых трансформаторов следует уделить разрядам данного рода, возникающим в масляных прослойках, которые вступают в непосредственный контакт с изоляцией твёрдого типа. В подобных случаях, как правило, повреждения твёрдого изоляционного слоя избежать не удаётся, что предполагает необходимость проведения в последующем ремонтных работ для восстановления нарушенного изоляционного покрытия. Это обуславливает существенную опасность, которую представляют частичные разряды для электроэнергетического оборудования в контексте возможности его быстрого разрушения на определённых участках и возникновения пробоев изоляционного слоя.

Во избежание возникновения подобной ситуации необходимо осуществление комплекса мероприятий, в общем виде имеющих следующую направленность:

- выполнение мониторинга частичных разрядов с целью формирования качественной оценки технического состояния масляных



прослойки оборудования силовых трансформаторных подстанций, а также оценки возможностей нарушения твёрдого слоя изоляции за счёт воздействия частичных разрядов на масляные прослойки;

- внедрение в промышленных объёмах оборудования для диагностики и анализа величины частичных разрядов и образования дефектных участков в изоляционном покрытии силовых трансформаторов;

- проведение научных экспериментов в области диагностирования текущего технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций и обеспечения их последующего бесперебойного функционирования с учётом возможностей разрушения изоляционного слоя.

Перспективы развития системы железных дорог Республики Казахстан во многом выстраиваются на качественной работе электроэнергетического оборудования, причём в данном контексте вопросы контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования играют важнейшую роль, поскольку позволяют поддерживать на должном уровне функционирование всего оборудования трансформаторных подстанций в течение продолжительного периода времени без проведения капитального ремонта и с обеспечением качественной профилактики текущего состояния оборудования трансформаторных подстанций и своевременным выявлением всех возможных дефектов эксплуатационного использования.

В последние несколько десятилетий в энергетических цехах отдельных предприятий железнодорожной отрасли и в целом в энергетическом секторе экономики Казахстана постепенно стали проявляться тенденции к последовательному переходу от практики проведения ремонтов планового характера, предназначенных для предупреждения возникновения неисправностей электрооборудования железнодорожного транспорта и профилактики возникновения проблем энергетической системы подвижного состава железных дорог, к выявлению и устранению реальных погрешностей технического состояния электрического оборудования, которое в основном практикуется в государствах с развитой экономикой и отлаженным функционированием системы железнодорожного транспорта. Подобное положение вещей

предполагает разработку и внедрение комплекса методов по своевременному диагностированию состояния электрического оборудования [7].

Бесперебойную работу силовых трансформаторов следует считать фактором, который во многом определяет безопасность функционирования промышленных предприятий, а также надёжность и качество снабжения электрической энергией организаций, принадлежащих к различным экономическим секторам. Качественное функционирование силовых трансформаторов обеспечивает согласование работы трансформаторных подстанций с системой, а также преобразование целого перечня параметров электроэнергии в необходимые для её последующего практического применения. Существенный уровень износа трансформаторного оборудования создаёт потенциальную опасность как для конечных потребителей, так и для персонала, в чьи непосредственные служебные обязанности входит обслуживание оборудования трансформаторных подстанций и контроль их технического состояния [8].

Энергетическая безопасность предприятий железнодорожной отрасли, по роду деятельности использующих силовые трансформаторы, которые во многом определяют качество энергообеспечения и надёжность функционирования всей энергосистемы железнодорожного транспорта, требует установления чёткой системы контроля технического состояния силовых трансформаторов, посредством использования разнообразных методов контроля, одним из которых является метод акустического диагностирования [9]. Использование трансформаторов рискованно само по себе, и высокая степень риска подобного использования представляет собой существенную опасность как для конечных потребителей электрической энергии, так и для обслуживающего персонала трансформаторных подстанций.

Внедрение диагностического оборудования в практику контроля за состоянием трансформаторных подстанций предполагает разработку серии подготовительных мероприятий, направленных на получение информации по текущим основным вопросам: выявление общего количества силовых трансформаторов с истекшим сроком эксплуатации, которые способны давать повышенное число отказов при их дальнейшем использовании; текущее

качество контроля функционирования силовых трансформаторных подстанций; выявленные нарушения принципов эксплуатации силовых трансформаторных подстанций согласно положениям государственных отраслевых стандартов; возможность постепенного перехода от практики проведения плановых ремонтов к ремонтам, обусловленным реальными проблемами технического состояния трансформаторной техники [10]. При этом следует принимать во внимание, что практика эксплуатации трансформаторного оборудования после окончания гарантийного срока его использования является общепринятой во всём мире, несмотря на то, что без принятия соответствующих мер по предотвращению и профилактике аварийных ситуаций она сопряжена с немалыми опасностями для оборудования трансформаторных подстанций. Также важным аспектом выступает практическая невозможность замены большого объёма трансформаторного оборудования в сжатые сроки, кроме того, она невыгодна с экономической точки зрения.

В современных экономических реалиях разработка и практическое применение методик контроля технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций является одной из основных задач служб технического контроля предприятий, использующих в своей практической деятельности оборудование данного рода. Внеплановые остановки силовых трансформаторных подстанций, произошедшие по причине аварийного выхода из строя трансформаторного оборудования, приводят к значительным материальным потерям, а в ряде случаев могут обернуться непредсказуемыми последствиями [11]. В данном контексте задачи своевременного контроля состояния силовых трансформаторов, использующихся в железнодорожной отрасли, приобретают особую важность, поскольку неразрывно связаны с качеством функционирования подвижного состава железной дороги, а также способствуют повышению общего уровня безопасности железнодорожного хозяйства.

На протяжении последних двух десятилетий для диагностики технического состояния силовых трансформаторов использовалась методика регистрации частичных разрядов в высоковольтном оборудовании энергетических систем. Подобная методика показала высокую эффективность при её непосред-

ственном использовании в различных отраслях, в том числе и в системе железнодорожного транспорта, благодаря полученным высоким результатам. Кроме того, хорошие результаты были достигнуты при использовании метода локации зон электромагнитной активности, который применялся исключительно на поверхности трансформатора и предполагал установку на данной поверхности датчиков измерения, а также прочих измерительных устройств. Подобные меры давали возможность сформировать полноценное заключение относительно технического состояния узла силового трансформатора, в котором были обнаружены дефекты, а также проблемы изоляционного слоя, нарушения функционирования барьеров, дуги магнитопровода, появление искрений и т.п. [12]. Информация такого рода, наряду с данными о типах имеющего место разрядного явления и его места, может отождествляться с конструктивными особенностями как самого трансформатора, так и его активной части. Таким образом, показатели надёжности функционирования могут быть спрогнозированы с высокой степенью достоверности, поскольку заключение относительно возможности дальнейшего функционирования формируется на основании не просто общих оценок характеристик частичных разрядов, а принимая во внимание точное место их расположения. В данном контексте следует отметить, что появление частичных разрядов в местах крепления магнитопроводов трансформаторов не представляет существенной значимости, поскольку малые величины частичных разрядов в витковой изоляции не могут принести существенного вреда конструкции.

Постоянный контроль текущего технического состояния оборудования силовых трансформаторных подстанций системы железнодорожного транспорта является одной из основных задач современной системы обеспечения энергетической безопасности указанной транспортной системы. В данном контексте контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического зондирования представляется одним из наиболее благоприятных методов обеспечения непрерывной работы транспортной энергосистемы с учётом особенностей функционирования железнодорожного транспорта в условиях современных экономических реалий. В целом именно качественное и надёж-



ное функционирование силовых трансформаторов является необходимым условием для последовательного преобразования серии энергетических параметров в величины, необходимые для дальнейшего использования электрической энергии. При этом необходимо в обязательном порядке учитывать степень риска использования оборудования трансформаторных подстанций, поскольку нарушения условий эксплуатации силового трансформаторного оборудования может стать причиной возникновения существенных проблем как для обслуживающего персонала, так и для конечных потребителей электрической энергии [13].

Современное оборудование силовых трансформаторных подстанций, которые применяются в различных узлах и объектах системы железнодорожного транспорта, требует регулярного проведения качественного контроля технического состояния силовых трансформаторных подстанций с использованием самых современных методов диагностики. Параллельное использование различных методов диагностики технического состояния силового трансформаторного оборудования позволяет получить оптимальные результаты при сравнении эффекта от использования нескольких методов диагностики, а также подобрать оптимальный метод контроля исходя из реалий сложившейся ситуации. Кроме того, диагностика состояния трансформаторного оборудования необходима для своевременного обнаружения дефектов, которые могут иметь пагубные последствия с точки зрения соображений безопасности функционирования оборудования силовых трансформаторных подстанций. В данном контексте при проведении диагностики и после её завершения следует обращать особое внимание на организацию качественного ремонта и устранения обнаруженных дефектов, что в последующем обеспечит полноценное функционирование силовых трансформаторных подстанций на протяжении длительного времени [14].

Вместе с тем, система мониторинга технического состояния силовых трансформаторных подстанций повышает эффективность функционирования силовых трансформаторов объектов железнодорожного транспорта, поскольку частота проверок в сочетании с их качеством и направленностью позволяет вы-

полнить профилактику возникновения повреждений и прочих дефектов конструкции, что исключает в последующем возникновение и развитие проблемных ситуаций, связанных с нарушениями правил эксплуатации трансформаторного оборудования. В данном контексте следует отметить, что силовые трансформаторы относятся к группе электрического оборудования с самой высокой частотой проявления повреждений [15]. Проведённые в разное время исследования продемонстрировали, что высоковольтные вводы трансформаторов характеризуются наибольшей повреждаемостью, поскольку на них приходится около 22 % всех повреждений, на обмотки – примерно 16 %, на оборудование РПН (регулирования напряжения под нагрузкой) – 13,5 %. Отмечено, что подобные повреждения с одинаковой частотой возникают у трансформаторов с различными сроками эксплуатации, в то время как применительно к трансформаторам со сроком эксплуатации от 10 до 30 лет справедливо утверждение о том, что именно у них отмечена наибольшая частота выхода из строя оборудования РПН. Также отмечено, что после 10 лет эксплуатации силовых трансформаторных подстанций повышается частота повреждений высоковольтных вводов. При этом следует принимать во внимание тот факт, что наиболее существенной проблемой силовых трансформаторов, приводящей к нарушению их работы порой на продолжительное время, является короткое замыкание [16]. Согласно полученной аналитической информации, повреждение обмоток силовых трансформаторов приводит к коротким замыканиям в 80 % среди всех случаев нарушений и общего количества повреждений трансформаторных обмоток, повреждение высоковольтных вводов – до 89 % всех случаев, нарушения функционирования РПН – до 25 % всех случаев, в то время как повреждения остальных узлов, а также ошибки при монтаже, различных ситуациях, возникающих при эксплуатации оборудования и его ремонте в совокупности дают до 36 % всех случаев коротких замыканий [17].

Проведение качественной диагностики текущего технического состояния силовых трансформаторов, использующихся на различных железнодорожных объектах, зачастую требует использования специальных приборов, а также дополнительных методов локализации зон электромагнитной активности на

поверхности трансформатора. Совокупность применяющихся методик обеспечения высокого качества проверки технического состояния силовых трансформаторов, предполагающих использование методик акустического диагностирования и смежных с ними, обеспечивает широкую вариативность данных контроля, на основании которых может быть составлена полноценная картина текущего состояния системы энергообеспечения различных объектов железнодорожного транспорта и перспектив развития данной отрасли в последующем [18].

Сохранению высокого качества работ по диагностированию состояния электротехнического оборудования и обеспечению высокого уровня выполнения работ по профилактике поломок силовых трансформаторов в процессе эксплуатации способствует проведение специальных экспериментальных исследований, направленных на установление взаимосвязи между техническим состоянием трансформаторных подстанций и качеством функционирования энергетической системы железнодорожного транспорта в целом [19]. Посредством проведения исследований данного рода формируется возможность оценивать качество работы трансформаторных подстанций и формировать комплекс мероприятий, направленных на улучшение функционирования трансформаторных подстанций с учётом необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ при поломках основного оборудования силовых линий. Ремонтно-восстановительные работы в таком случае должны проводиться с учётом особенностей конкретных типов трансформаторов и степени поломок, причём качество ремонта оборудования силовых трансформаторных подстанций тесно связано с эффективностью определения причин возникновения поломок электрооборудования, а также временем определения [20].

Таким образом, вопросы контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования требуют детального изучения для формирования качественного понимания вопросов обеспечения энергетической безопасности и целостности важнейших узлов и объектов железнодорожного транспорта, в состав которых входит оборудование силовых трансформаторных подстанций. При этом уровень безопасности указанных объектов должен

быть соотносим с уровнем проведения мероприятий, направленных на поддержание безопасности энергетической системы в целом.

ВЫВОДЫ

Исследование ключевых аспектов выполнения контроля технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования привело к следующим выводам. Резонансные акустические датчики частичных разрядов «AC-Sensor» показали высокую эффективность в вопросах обнаружения частичных разрядов на поверхности изоляционного слоя оборудования силовых трансформаторных подстанций. Это обуславливает широкие перспективы использования датчиков данного типа в последующем, при проведении экспериментальных исследований и работ по определению основных особенностей технического состояния силовых трансформаторов с использованием методов акустического диагностирования. Данное оборудование продемонстрировало высокие эксплуатационные характеристики непосредственно при использовании данного метода.

В целом акустический метод контроля показал хорошие результаты, поскольку его основные достоинства, такие, как оперативность контроля и возможность снятия показаний при условии сохранения непрерывной подачи силового напряжения в целом позволяют сократить время проведения эксперимента с получением высокоточных результатов. Кроме того, метод акустического диагностирования с использованием датчиков частичных разрядов «AC-Sensor» показал высокую эффективность при определении причин возникновения нарушений на поверхности изоляционного слоя силовых трансформаторов, а также возможность максимально точной локализации участков возникновения подобных повреждений.

Проведение в последующем диагностических обследований силовых трансформаторов, применяющихся в системе железнодорожного транспорта Республики Казахстан, с использованием методик акустического диагностирования, позволяет существенно расширить представления относительно возможностей использования указанной методики для разрешения вопросов оценки техни-



ческого состояния современных трансформаторных подстанций.

Результаты, полученные в ходе данного исследования, в последующем смогут послужить качественной теоретической базой для дальнейших исследований проблем и вопросов контроля технического состояния силовых трансформаторов, выполняемого с использованием различных современных методов, способных вывести на качественно новый уровень исследования в сфере обеспечения безопасности эксплуатационного использования электроэнергетического оборудования, применяющегося в системе железнодорожного транспорта на сегодняшний день.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Forsthofer, M. Forsthofer's Component Condition Monitoring. 1st ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2018, 204 p. ISBN 9780128097724.
2. Papaalias, M., Marquez, F. P. G., Karyotakis, A. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets. 1st ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2019, 404 p. ISBN 9780128097472.
3. Kaneko, A.; Xiao-Hua, Zhu; Ju, Lin. Coastal Acoustic Tomography. Oxford, Elsevier, 2020, 362 p. ISBN 9780128185070.
4. Meshkinzar, A., Al-Jumaily, A. M., Harris, P. D. Acoustic Amplification Utilizing Stepped-Thickness Piezoelectric Circular Cylindrical Shells. Journal of Sound and Vibration, 2018, Vol. 437, pp. 110–118. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.08.033.
5. Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Кузнецова М. А., Симаков А. В. Определение пороговых значений при диагностировании изоляции высоковольтного оборудования методами регистрации частичных разрядов // Омский научный вестник. – 2019. – № 2 (164). – С. 30–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-30-35.
6. Janssen, L. A. L., Arteaga, I. L. Data processing and augmentation of acoustic array signals for fault detection with machine learning. Journal of Sound and Vibration, 2020, Vol. 483, article number 115483. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115483.
7. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Карандаева О. И., Мостовой С. Е., Чертоусов А. А. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – № 26. – С. 26–31. [Electronic resource]: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/662/5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Last accessed 27.05.2021.
8. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Девятков Д. Х., Парсукин Б. Н., Сарлыбаев А. А. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов // Вестник Магнитогорского

государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 105–108. [Electronic resource]: http://www.vestnik.magtu.ru/images/data_base/2012_1/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA_2012_1_%D1%81_105-108.pdf. Last accessed 27.05.2021.

9. Malik, H., Fatema, N., Iqbal, A. Intelligent data-analytics for condition monitoring: Smart Grid Applications. London, Academic Press, 2021, 491 p. ISBN 9780323855112.
10. Blanloeuil, P., Francis Rose, L. R., Veidt, M., Wang, Chun H. Time reversal invariance for a one-dimensional model of contact acoustic nonlinearity. Journal of Sound and Vibration, 2017, Vol. 394, pp. 515–526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.050>.
11. Arroyo, C. P., Leonard, T., Sanjose, M., Moreau, S., Duchaine, F. Large eddy simulation of a scale-model turbofan for fan noise source diagnostic. Journal of Sound and Vibration, 2019, Vol. 445, pp. 64–76. DOI: 10.1016/J.JSV.2019.01.005. [Electronic resource]: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02419816/document>. Last accessed 27.05.2021.
12. Weilenmann, M., Noiray, N. Experiments on sound reflection and production by choked nozzle flows subject to acoustic and entropy waves. Journal of Sound and Vibration, 2021, Vol. 492, article number 115799. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115799.
13. The Power Grid: Smart, Secure, Green and Reliable. 1st ed. Editor Brian W. D'Andrade. London, Academic Press, 2017, 352 p. Paperback ISBN 9780128053218, eBook ISBN 9780081009529.
14. Bjørnø, Leif. Applied Underwater Acoustics. 1st ed. Editors Th. Neighbors, D. Bradley. Oxford, Elsevier, January 19, 2017, 980 p. eBook ISBN 9780128112472, Paperback ISBN 9780128112403.
15. Correa, J. C. A. J., Guzman, A. A. L. Mechanical Vibrations and Condition Monitoring. 1st ed. London, Academic Press, 2020, 208 p. Paperback ISBN 9780128197967, eBook ISBN 9780128203903.
16. Varanasi, S., Siegmund, T., Bolton, J. S. Acoustical characteristics of segmented plates with contact interfaces. Journal of Sound and Vibration, 2020, Vol. 485, article number 115584. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115584. [Electronic resource]: <https://arxiv.org/pdf/2102.04987v1.pdf>. Last accessed 27.05.2021.
17. Elasha, F., Greaves, M. J., Mba, D., Fang, D. A comparative study of the effectiveness of vibration and acoustic emission in diagnosing a defective bearing in a planetary gearbox. Applied Acoustics, 2017, Vol. 115, pp. 181–195. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.026>. [Electronic resource]: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/11144>. Last accessed 27.05.2021.
18. Kuryliak, D., Lysenko, V. Acoustic plane wave diffraction from a truncated semi-infinite cone in axial irradiation. Journal of Sound and Vibration, 2017, Vol. 409, pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.07.035.
19. Wang, Yuebing; Sun, Min; Cao, Yonggang; Zhu, Jiang. Application of optical interferometry in focused acoustic field measurement. Journal of Sound and Vibration, 2018, Vol. 426, pp. 234–243. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.04.023.
20. Yang, Lietai. Techniques for Corrosion Monitoring. 2nd ed. Sawston, Woodhead Publishing, 2020, 618 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01137-8>. ISBN 978-0-08-103003-5. ●

Информация об авторе:

Еркебаев Айбек Жомартович – аспирант кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия / Алматы, Казахстан, erkebaev7397-1@murdoch.in.

Статья поступила в редакцию 08.12.2021, одобрена после рецензирования 14.02.2022, принята к публикации 21.02.2022.