

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье приводится техническое решение для повышения достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры. Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является расположение тяговых подстанций вдоль железнодорожного пути. Эксплуатация силовых трансформаторов осуществляется в открытых условиях. Показано, что для диагностирования силовых трансформаторов целесообразно использовать переносные комплексы на основе акустического контроля частичных разрядов благодаря их высокой мобильности и относительной простоте установки. Для повышения достоверности диагностирования в условиях сезонных изменений температуры предложено использовать имитатор дефектов и дифференциальный способ измерения параметров частичных разрядов. Предложены схема проведения экспериментов и структурная схема имитатора дефектов. Приведены выражения, описывающие распространение акустических волн при изменении температуры и, соответственно, свойств трансформаторного масла. Приводятся данные диагностирования, полученные на силовых трансформаторах системы электроснабжения железных дорог, показывающие возможные случаи пропуска дефектов и их выявление при использовании предложенного имитатора дефектов.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы, акустический контроль, частичные разряды, изменения температуры, свойства масла, распространение волн, повышение достоверности, имитатор дефектов.

### ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы (СТ) являются основным оборудованием в системе электроснабжения железных дорог. Срок службы СТ зависит от состояния изоляции внутри маслонаполненного бака. Старение изоляции внутри бака СТ происходит из-за электрических, механических и термических нагрузок. Последствия этих нагрузок приводят к возникновению частичных разрядов (ЧР) внутри СТ, что может привести к его аварийному отключению.

Для осуществления непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов в системе электроснабжения железных дорог используются различные методики и технические средства. Применение акустических методов отличается повышенным быстродействием и информативностью [1]. Использование приборов акустического контроля существенно повышает достоверность и временные характеристики широко применяемого хроматографического метода диагностирования силовых трансформаторов.

Вместе с тем к основным задачам дальнейшего совершенствования акустических методов при контроле силовых трансформаторов можно отнести распознавание вида контролируемого дефекта, его развитие во времени и локацию места его положения.

Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является расположение тяговых подстанций вдоль железнодорожного пути. Эксплуатация силовых трансформаторов осуществляется в открытых условиях. Показано, что для диагностирования силовых трансформаторов целесообразно использовать переносные комплексы на основе акустического контроля частичных разрядов благодаря их высокой мобильности и относительной простоте установки.

Современные автоматизированные системы аку-

стического контроля со встроенным программным обеспечением позволяют регистрировать частичные разряды, определять их количество в единицу времени, амплитуды и форму отдельных сигналов, другие параметры. По разности времен прихода сигналов к датчикам акустической антенны, располагаемых в местах наибольшего сигнала на корпусе трансформатора, возможно установление координат предполагаемого дефекта и его вида [2].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье предложено устройство для определения дефектов изоляции силовых трансформаторов по наличию частичных разрядов, регистрируемых акустическим методом с использованием имитатора дефектов. Для повышения достоверности определения дефектов, их развития во времени предложено использование имитатора дефектов. Выполнение измерений в различное время года (зима, весна, лето, осень), сопровождающихся сезонными изменениями температуры, приводит к дополнительным погрешностям, связанным с изменением свойств трансформаторного масла [3, 4].

Проведенный анализ отечественной [5, 6] и зарубежной [7-9] литературы выявил наличие большого количества работ, посвященных методам и способам диагностирования высоковольтного оборудования.

Основная сложность применяемых акустических методов при контроле трансформаторов и другого высоковольтного оборудования связана с распознаванием вида контролируемого дефекта и локацией места его положения.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основная идея использования имитатора дефектов заключается в одновременных измерениях сигналов на СТ и имитаторе дефектов [4]. Если при изменении температуры значение опорного напряжения на

имитаторе дефектов не изменяется, следовательно, дефект не развивается во времени, а увеличение амплитуды связано с изменениями свойств трансформаторного масла. Если при изменении параметров акустического сигнала наблюдается увеличение опорного напряжения на имитаторе дефектов при сезонном изменении температуры, то наблюдается развитие дефекта диагностируемого СТ.

При использовании имитатора дефектов повышается достоверность диагностирования дефектов и динамики их изменения методом регистрации ЧР при сезонных изменениях температуры для СТ, находящихся в эксплуатации на открытом воздухе вне производственных помещений.

Технический результат, обеспечивающий решение поставленной задачи, заключается в уменьшении вероятности определения ложных дефектов путем использования в процессе диагностирования имитатора дефектов, использования дифференциального метода измерений, совместной обработки параметров частичных разрядов, полученных на диагностируемом СТ и имитаторе дефектов при одинаковой температуре трансформаторного масла на обоих объектах.

Предлагаемое устройство для мониторинга СТ содержит блок измерения температуры обмоток, блок цифровой акустической диагностики, акустические измерительные преобразователи, блок расчетных моделей, блок визуализации контролируемых параметров трансформатора.

При этом на бак СТ устанавливаются акустические преобразователи, выходы которых соединены со входами блока цифровой акустической диагностики, выход блока цифровой акустической диагностики подключен ко входу блока расчетных моделей (БРМ), к другому входу БРМ подключен выход блока измерения температуры обмоток СТ. Выход блока расчетных моделей подключен ко входу блока визуализации контролируемых параметров трансформатора (БВКП).

Для компенсации температурных погрешностей, вызванных сезонными изменениями температуры, изменениями вязкости и коэффициента затухания при распространении акустических волн и, как следствие, уменьшением амплитуды, частотных характеристик, формы сигнала, дополнительно введен блок имитатора дефектов, содержащий регулируемый блок питания постоянного тока, электронный коммутатор, генератор тактовых импульсов, повышающий трансформатор, маслонаполненный бак, электрический разрядник, блок контроля температуры имитатора дефектов, блок поддержания температуры в маслонаполненном баке.

На рис. 1 представлена схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов.

Предлагаемое устройство для регистрации параметров ЧР на СТ с применением имитатора дефектов (рис. 1) содержит: силовой трансформатор (СТ) 1; блок имитатора дефектов (ИД) 2, состоящий из регулируемого блока питания постоянного тока (БП) 3, электронного коммутатора (ЭК) 4, генератора тактовых импульсов (ГТИ) 5, повышающего трансформатора (ПТ) 6; маслонаполненного бака (МБ) 7, электрическо-

го разрядника (ЭР) 11, блока контроля температуры имитатора дефектов 8; блок поддержания температуры в маслонаполненном баке 13; блок измерения температуры обмоток СТ 9; блок цифровой акустической диагностики (БЦАД) 10; акустические измерительные преобразователи 12; блок расчетных моделей (БРМ) 14; блок визуализации контролируемых параметров трансформатора (БВКП) 15.

На рис. 2 приведена схема расположения электрического разрядника в маслонаполненном баке ИД. На рис. 3 приведена схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника на верхней крышке маслонаполненного бака ИД.

Поддержание температуры масла в ИД, равной температуре масла диагностируемого СТ, осуществляется блоком поддержания температуры в маслонаполненном баке 13.

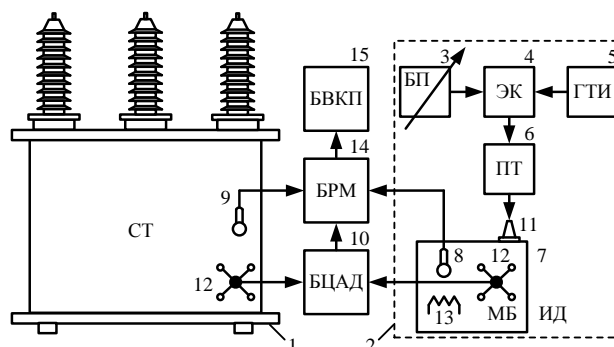


Рис. 1. Схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов

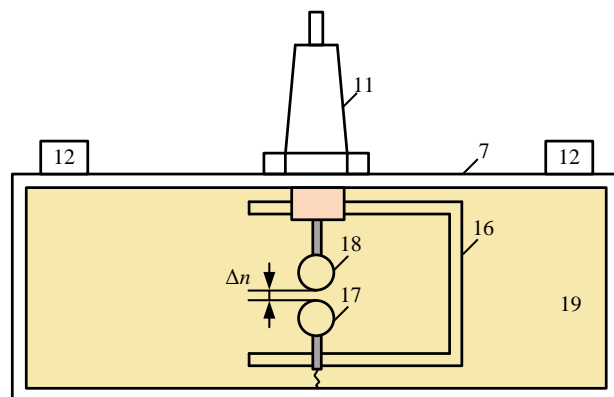


Рис. 2. Схема расположения электрического разрядника в маслонаполненном баке

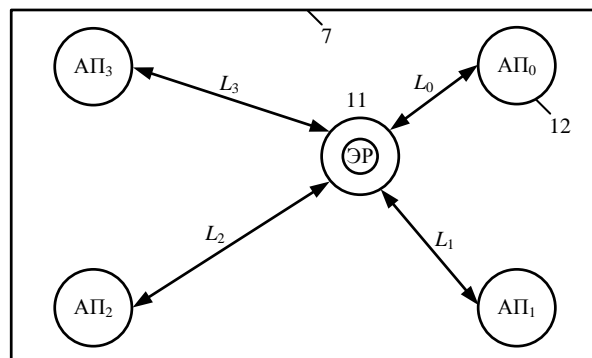


Рис. 3. Схема расположения акустических преобразователей и электрического разрядника на верхней крышке маслонаполненного бака

Устройство для мониторинга силовых трансформаторов (см. **рис. 1**) работает следующим образом. Все основные рабочие параметры силового трансформатора измеряют и контролируют с помощью блоков измерения первичных параметров.

Блок цифровой акустической диагностики БЦАД 10 обеспечивает акустический контроль и непрерывную фиксацию интенсивности частичных разрядов, а также амплитуду, фазу и пространственные координаты каждого импульса. С помощью встроенного программного обеспечения осуществляется обработка информации об интенсивности, амплитудах, фазах и пространственных координатах частичных разрядов, по результатам которой определяются участки с наибольшей разрядной активностью. Поскольку частичные разряды являются признаками деструктивных процессов в изоляции, это позволяет оперативно локализовать место возникновения неисправности в объемном пространстве бака трансформатора.

Более подробно методика локализации частичных разрядов описана в работе [1]. На приведенных объемных схемах локализации показаны изменения координат участков с повышенной интенсивностью разрядных явлений в течение шести месяцев. Анализ пространственного перемещения данных центров, а также динамики изменения разрядной активности позволяет выполнять оценку интенсивности развития деструктивных процессов в изоляции в реальном времени.

Блок расчетных моделей 14 по данным измерений в реальном масштабе времени на основе информации от первичных преобразователей [2], блока измерения температуры обмоток СТ 9, блока цифровой акустической диагностики (БЦАД) 10 осуществляет вычисление срока службы силового трансформатора и скорости старения изоляции.

Блок визуализации контролируемых параметров 15 обеспечивает оператору возможность удобной работы с текущими, архивными и полученными расчетным путем значениями рабочих параметров в виде таблиц и/или графиков, что позволяет своевременно отследить возникновение предаварийной или аварийной ситуации и принять меры по предотвращению и/или устранению такой ситуации. Диагностическая информация сохраняется длительное время и позволяет делать выводы о развитии дефектов.

Применение имитаторов дефектов в системах акустического контроля описано в работах [2, 6], их применение в основном предназначено для калибровки измерительных каналов.

Предлагаемый имитатор дефектов 2 позволяет воспроизводить импульсы частичных разрядов, аналогичные импульсам, зарегистрированным от дефектов диагностируемого трансформатора с различной амплитудой, фазой и частотой следования. При реализации дифференциального метода измерений на первом этапе регистрируют импульсы частичных разрядов на диагностируемом СТ 1 при помощи акустических датчиков 12, затем эти датчики переносят на маслонеполненный бак 7 в составе ИД, и регистрируют частичные разряды, сформированные электрическим разрядником 11. ЭР 11 установлен на крышке масло-наполненного бака 7 таким образом (**рис. 2**), что разрядники 17 и 18

находятся в трансформаторном масле 19, а промежутки между ними может регулироваться при помощи кронштейна 16. На регулируемом блоке питания постоянного тока (БП) 3 устанавливают напряжение, соответствующее порогу возникновения частичных разрядов. Это напряжение подается на электронный коммутатор 4, который управляется генератором тактовых импульсов 5 с частотой, соответствующей частоте следования ЧР на диагностируемом СТ 1. С выхода повышающего трансформатора 6 на электрический разрядник 11 поступают высоковольтные импульсы, вызывающие ЧР. При помощи регулирования опорного напряжения на БП добиваются одинаковой амплитуды ЧР, зарегистрированной на ВТ и ИД, и запоминают это значение.

При сезонных изменениях температуры масло в силовых трансформаторах, эксплуатируемых на открытом воздухе, изменяет свои свойства. Изменяется вязкость масла [3], а следовательно, изменяются коэффициенты фазы и затухания при распространении акустических волн [10], что, в свою очередь, влияет на параметры акустических импульсов, регистрируемых измерительной аппаратурой.

Как показано в работе [10], комплексное волновое число распространения акустической волны описывается выражением

$$k^2 = \frac{\omega^2}{V_l^2 + j \frac{\omega b}{\rho_0}}, \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число, 1/м;  $\omega$  – круговая частота, 1/с;  $V_l$  – скорость распространения акустической волны в среде, м/с;  $b$  – эффективный коэффициент вязкости;  $\rho_0$  – удельная плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

При условии, что если  $b\omega/\rho_0 V_l^2 \ll 1$ , что соответствует малому затуханию звука на расстоянии порядка длины волны, комплексное волновое число

$$k = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_l^2} \left[ 1 - j \frac{\omega b}{\rho_0 V_l^2} \right]} \cong \frac{\omega}{V_l} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega b}{\rho_0 V_l^2} \right) = k - ja. \quad (2)$$

Вещественная составляющая постоянной распространения, 1/м:

$$k = \frac{\omega}{V_l}, \quad (3)$$

представляет собой коэффициент фазы, позволяющий рассчитать изменение длины волны, а мнимая часть  $a$  – коэффициент затухания, 1/м, который можно вычислить по формуле

$$a = \frac{b\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \eta' + x \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент сдвиговой (поперечной) вязкости, Па·с;  $\eta'$  – коэффициент объемной вязкости, Па·с;  $x$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К);  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Здесь  $b$  – эффективный коэффициент вязкости:

$$b = \frac{4}{3} \eta + \eta' + x \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right). \quad (5)$$

Основной причиной затухания акустических волн является сила вязкого сопротивления между соседними частицами среды, обладающими различными скоростями, она учитывается первым слагаемым в выражении (4).

В связи с вышеизложенным увеличение амплитуды импульсов, вызванных частичными разрядами в СТ при сезонном изменении температуры, можно ложно принять за нарастание дефекта. Применение имитатора дефектов позволяет избежать подобных ошибок. При выполнении измерений при одинаковых температурах масла СТ и ИД дополнительно регистрируют опорное напряжение на выходе БП 3 и опорную частоту ГТИ 5. При условии равенства амплитуд зарегистрированных ЧР, если не происходит увеличения опорного напряжения, делают вывод, что дефект не увеличивается.

В **таблице** приведен пример данных диагностирования при сезонных изменениях температуры от +20°C до -10°C.

При диагностировании СТ с использованием имитатора дефектов регистрируется опорное напряжение БП. Во втором и третьем столбце наблюдается увеличение амплитуды ЧР при сезонном изменении температуры от 100 до 150 ед. АЦП, однако оба значения зарегистрированы при одинаковом значении  $U_{оп} = 5,5$  В, что позволяет считать, что энергия высоковольтных импульсов, вызывающих ЧР, остается постоянной, следовательно, увеличения дефектов не наблюдается, а повышение амплитуды связано с сезонным изменением температуры и изменением свойств трансформаторного масла.

Во втором и четвертом столбцах наблюдается увеличение амплитуды ЧР при сезонном изменении температуры от 100 до 150 ед. АЦП, однако эти значения зарегистрированы при разных значениях  $U_{оп1} = 5,5$  В и  $U_{оп2} = 6,8$  В, что позволяет считать, что энергия высоковольтных импульсов, вызывающих ЧР, увеличивается, следовательно, наблюдается увеличение дефекта изоляции СТ, и повышение амплитуды связано в первую очередь с увеличением дефекта и в меньшей степени с изменением свойств трансформаторного масла.

**Сравнение сигналов на силовом трансформаторе и имитаторе дефектов при сезонных изменениях температуры**

Силовой трансформатор			
Амплитуда, ед. АЦП	100	150	150
Частота, кГц	200	150	150
Длительность, мкс	300	20	20
Температура, °С	+20	-10	-10
Имитатор дефектов			
Опорное напряжение, В	5,5	5,5	6,8
Амплитуда, ед. АЦП	100	150	150
Частота, кГц	200	150	150
Длительность, мкс	30	20	20
Температура, °С	+20	-10	-10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено описание устройства имитатора дефектов, предназначенного для генерации сигналов, аналогичных регистрируемым акустическим сигналам в системах диагностирования высоковольтного маслонаполненного оборудования на примере силовых трансформаторов. Предлагаемый имитатор дефектов целесообразно использовать с современными системами диагностирования СТ, в составе которых имеются блоки акустического контроля.

Повышение достоверности контроля состояния трансформатора подтверждается при сезонных изменениях температуры. Выполняются одновременные измерения сигналов на СТ и имитаторе дефектов. На данных натуральных измерений было показано – если при изменении температуры значение опорного напряжения на имитаторе дефектов не изменялось, означало что, дефект не развивался во времени, а увеличение амплитуды было связано с изменениями свойств трансформаторного масла. В случае, когда при изменении параметров акустического сигнала наблюдалось увеличение опорного напряжения на имитаторе дефектов при сезонном изменении температуры, означало, что наблюдается развитие дефекта диагностируемого СТ.

В доказательство приведенных натуральных измерений приведены зависимости коэффициентов распространения и затухания акустических волн при их распространении. При этом для сезонных изменений температуры изменяется коэффициент вязкости трансформаторного масла, что приводит к изменениям амплитуды и формы регистрируемых акустических сигналов. Поэтому для выявления развивающихся дефектов необходимо выполнять сравнение сигналов от силового трансформатора и имитатора дефектов, вырабатывающих сигналы с различной дозированной мощностью.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика диагностирования силовых трансформаторов на основе кластерной обработки акустических сигналов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Л. Цемошевич, С.Е. Мостовой, А.В. Ануфриев, А.А. Сарлыбаев // Известия вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 86-90.
2. Пат. 2370784 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ определения места локализации и вида дефектов в активной части электрической машины, находящейся в рабочем режиме / Аксенов Ю.П., Прошлецов А.П.; заявитель Аксенов Юрий Петрович. № 2008108297/28, заявл. 05.03.2008, опубл. 20.10.2009.
3. ГОСТ 982-80. Масла трансформаторные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 7 с.
4. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов / В.Т. Черемисин, А.А. Кузнецов, М.А. Волчанина, А.В. Горлов // Транспортные системы и технологии. 2020. № 6(4). С. 161-171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171
5. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: се-

- тевой электронный научный журнал. 2013. № 1(2). С. 58-68.
6. Пат. 2615790 С1 Российская Федерация, МПК Н02Н 7/04. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов / Храмшин В.Р., Карандаев А.С., Храмшин Р.Р., Евдокимов С.А., Сарлыбаев А.А., Николаев А.А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2016102967, заявл. 29.01.2016, опубл. 11.04.2017.
  7. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements / I.B.M. Taha, S.S. Dessouky, R.N.R. Ghaly, S.S.M. Ghoneim // Alexandria Engineering Journal. 2020. № 59(6). Pp. 4759-4769. doi: 10.1016/j.aej.2020.08.041
  8. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers / S.M. Strachan, S. Rudd, S.D.J. McArthur, M.D. Judd, S. Meijer, E. Gulski // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. № 15(1). Pp. 259-268. doi: 10.1109/T-DEI.2008.4446759
  9. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. №15 (6). Pp. 1576-1583. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
  10. Соловьянова И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов. Акустические волны. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. 142 с.

Поступила в редакцию 10 ноября 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INCREASING THE RELIABILITY OF POWER TRANSFORMERS DIAGNOSING UNDER SEASONAL TEMPERATURE CHANGES

Maria A. Volchanina

Postgraduate Student, Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, kuznetcova994@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3757-5580>

Andrey A. Kuznetsov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, KuznetsovAA@omgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1815-4679>

Anton V. Gorlov

Postgraduate Student, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, anton.gorlov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8413-661>

The article provides a technical solution to improve the reliability of power transformers diagnosing in conditions of seasonal temperature changes. A feature of the railway transport power supply system is the location of traction substations along the railway track. Operation of power transformers is carried out in open conditions. It is shown that for diagnosing power transformers, it is advisable to use portable systems based on acoustic monitoring of partial discharges due to their high mobility and relative ease of installation. To improve the reliability of diagnostics in conditions of seasonal temperature changes, it is proposed to use a defect simulator and a differential method for measuring the parameters of partial discharges. A scheme for carrying out experiments and a structural diagram of a defect simulator are proposed. Expressions are given that describe the propagation of acoustic waves with a change in the temperature, and, accordingly, the properties of transformer oil. The data of diagnostics obtained on power transformers of the railway power supply system are presented showing possible cases of defects and their identification when using the proposed defect simulator.

**Keywords:** power transformers, acoustic control, partial discharges, temperature changes, oil properties, wave propagation, reliability enhancement, defect simulator.

#### REFERENCES

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoy S.E., Anufriev A. V., Sarlybaev A.A. Methodology for diagnosing power transformers based on cluster processing of acoustic signals. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 86-90. (In Russian)
2. Aksenov Yu.P., Proshletsov A.P. *Sposob opredeleniya mesta lokalizatsii i vida defektov v aktivnoy chaste elektricheskoy mashiny, nakhodyashcheyся v rabochem rezhime* [A method for determining the location and type of defects in the active part of an electrical machine in operating mode]. Patent RF, no. 2370784, 2009.
3. GOST R 982-80–2011. Transformer oils. Specifications. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2011. 7 p. (In Russian)
4. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Transportnyye sistemy i tekhnologii* [Transportation systems and technologies], 2020, no. 6(4), pp. 161-171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171. (In Russian)
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements for the system for monitoring the technical condition of the transformer of a heavy-duty steel arc furnace. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 1(2), pp. 58-68. (In Russian)
6. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Nikolaev A.A. *Ustroystvo dlya monitoringa silovykh transformatorov* [Power transformer monitoring device]. Patent RF, no. 2615790 C1, 2017.
7. Ibrahim B.M. Taha, Sobhy S. Dessouky, Ramy N.R. Ghaly, Sherif S.M. Ghoneim. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, vol. 59(6), pp. 4759-4769. doi: 10.1016/j.aej.2020.08.041
8. SM Strachan, S Rudd, SDJ McArthur, MD Judd, S Meijer, E Gulski. Knowledge-based diagnosis of partial discharges

- in power transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008, vol. 15(1), pp. 259-268. doi:10.1109/t-dei.2008.4446759
9. S.M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008, vol. 15(6), pp. 1576-1583. doi: 10.1109/tdei.2008.4712660
10. Solovyanova I.P., Shabunin S.N. Teoriya volnovykh protsessov. Akusticheskie volny [The theory of wave processes. Acoustic waves]. Yekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2004. 142 p. (In Russian)
- 
- Волчанина М.А., Кузнецов А.А., Горлов А.В. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 33-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-33-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38)
- Volchanina M.A., Kuznetsov A.A., Gorlov A.V. Increasing the Reliability of Power Transformers Diagnosing under Seasonal Temperature Changes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 33-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-33-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38)
-