ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3+534.87+608.2

Максим Викторович Вечеркин
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Россия, Магнитогорск, e-mail: vecherkin@inbox.ru

Андрей Юрьевич Леднов
ООО «ДМА», инженер, Россия, Магнитогорск, e-mail: lednov@mail.ru

Анвар Сабулханович Сарваров
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: anvar@magtu.ru

Денис Михайлович Долгушин
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Россия, Магнитогорск, e-mail: denisdolgushin@mail.ru

Математическая модель для выбора границ диапазонов частот при регистрации акустических сигналов частичных разрядов в высоковольтных трансформаторах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повреждение изоляции является одной из основных причин неисправностей в высоковольтных трансформаторах. Информативными характеристиками, отражающими состояние изоляции, являются характеристики частичных разрядов. Одним из эффективных способов мониторинга технического состояния высоковольтных трансформаторов является регистрация и анализ акустических сигналов частичных разрядов. Однако в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики диагностирования трансформаторов, основанные на анализе таких сигналов. Это обусловлено рядом недостаточно исследованных проблем, одна из которых – неопределенность границ частотного диапазона для практического измерения акустических сигналов частичных разрядов. В связи с этим разработка математической модели для выбора границ диапазонов частот при регистрации акустических сигналов частичных разрядов в высоковольтных трансформаторах является актуальной задачей.
Материалы и методы. Исследование импедансной математической модели, учитывающей основные акустические свойства маслонаполненного трансформатора как многослойного объекта, проведено с использованием характерного параметра – коэффициента пропускания, определяющего долю амплитуды акустического сигнала, прошедшего через объект.
Результаты. Получены зависимости коэффициента пропускания от частоты акустического сигнала для различных толщин стальной стенки бака трансформатора. Показано, что эти зависимости для разных толщин существенно различаются лишь в высокочастотной области.

© Вечеркин М.В., Леднов А.Ю., Сарваров А.С., Долгушин Д.М., 2024
Вестник ИГЭУ, 2024, вып. 6, с. 51–57.

Выводы. При анализе частотных зависимостей коэффициента пропускания акустических сигналов можно выделить достаточно узкий диапазон частот, содержащий максимальные значения этого коэффициента. Этот частотный диапазон можно рекомендовать в качестве рабочей полосы частот при выборе или создании средств измерений акустических сигналов частичных разрядов, а также при поиске диагностических признаков состояния изоляции в маслонаполненном высоковольтном оборудовании.

Ключевые слова: частичный разряд, высоковольтный трансформатор, акустический сигнал, акустический импеданс, коэффициент пропускания

Maksim Viktorovich Vecherkin
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Physics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: vecherkin@inbox.ru

Andrey Yuryevich Lednov
“DMA” LLC, Engineer, Russia, Magnitogorsk, e-mail: lednov@mail.ru

Anvar Sabulkhanovich Sarvarov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: anvar@magtu.ru

Denis Mikhailovich Dolgushin
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor of Physics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: denisdolgushin@mail.ru

Mathematical model for selection of frequency range boundaries when recording acoustic signals of partial discharges in high-voltage transformers

Abstract

Background. Insulation damage is one of the main causes of faults in high-voltage transformers. Partial discharge characteristics are informative characteristics reflecting the state of insulation. One of the effective ways to monitor the technical condition of high-voltage transformers is to record and analyze acoustic signals of partial discharges. However, at present there are no generally recognized methods of transformer diagnostics based on the analysis of such signals. It is due to several understudied problems, one of which is the uncertainty of the boundaries of the frequency range for practical measurement of acoustic signals of partial discharges. Thus, the development of a mathematical model to select the boundaries of frequency ranges when recording acoustic signals of partial discharges in high-voltage transformers is an urgent task.
Materials and methods. The study of the impedance mathematical model, which considers the basic acoustic properties of an oil-filled transformer as a multilayer object, has been carried out using a characteristic parameter, i.e. the transmission coefficient. It determines the fraction of the amplitude of the acoustic signal that has passed through the object.
Results. The dependences of the transmittance coefficient on the frequency of the acoustic signal for different thicknesses of the steel wall of the transformer tank have been obtained. It is shown that these dependences for different thicknesses differ significantly only in the high-frequency region.
Conclusions. When analyzing the frequency dependences of the acoustic signal transmission coefficient, it is possible to identify a rather narrow frequency range containing the maximum values of this coefficient. This frequency range can be recommended as an operating frequency band when selecting or creating measuring instruments for acoustic signals of partial discharges, as well as when searching for diagnostic signs of insulation in oil-filled high-voltage equipment.

Key words: partial discharge, high-voltage transformer, acoustic signal, acoustic impedance, transmittance

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.051-057

Введение. Мониторинг технического состояния высоковольтных силовых трансформаторов является важной задачей, решение которой обеспечивает безаварийную работу энергоемких потребителей во всех отраслях промышленности.

Одной из основных причин возникновения неисправностей в высоковольтных трансформаторах является повреждение изоляции. Наиболее информативными характеристиками, отражающими состояние изоляции, являются характеристики ча-

стичных разрядов (ЧР). Появление и увеличение интенсивности ЧР является достоверным признаком повреждения изоляции и сигналом зарождающейся неисправности [1, 2]. Анализ характеристик ЧР является эффективным средством оценки текущего технического состояния высоковольтного оборудования.

Электрические параметры ЧР, а также методики испытаний высоковольтных силовых трансформаторов нормируются специальными документами[1]. Способы регистрации и обработки электрических сигналов ЧР многократно описаны в литературе [1, 2, 3]. Направление, связанное с анализом электрических сигналов ЧР, продолжает развиваться. Имеются исследования, связанные с реализацией метода применительно к современным цифровым трансформаторам тока и напряжения [4].

Основной проблемой, возникающей при проведении измерений электрических сигналов ЧР в высоковольтных трансформаторах, является очень сложная отстройка от многочисленных электромагнитных помех [3]. Помехи могут быть обусловлены грозовыми разрядами, коронными разрядами на вводах трансформатора, ЧР, возникающими в других устройствах, которые могут по соединительным линиям наводиться в исследуемом трансформаторе, и другими причинами.

Перспективным направлением мониторинга высоковольтных силовых трансформаторов является регистрация и анализ акустических сигналов ЧР [5]. Считается, что метод акустической регистрации ЧР позволяет избавиться от влияния электромагнитных помех, возникающих в высоковольтных трансформаторах. Кроме этого, акустический метод обеспечивает оперативное выявление и локализацию неисправностей трансформаторов без снятия напряжения [6, 7].

Для высоковольтных трансформаторов в настоящее время отсутствуют нормируемые характеристики акустических сигналов ЧР и общепризнанные методики диагностирования неисправностей, основанные на анализе таких сигналов. Это обусловлено рядом недостаточно исследованных проблем, одна из которых – неопределенность границ частотного диапазона для измерения акустических сигналов ЧР. Как следствие, выпускаемые серийно акустические регистраторы ЧР имеют существенный разброс рабочих диапазонов частот (табл. 1).

Таблица 1. **Акустические регистраторы частичных разрядов**

Фирма-производитель	Название прибора	Частотный диапазон
НПО «Техносервис-Электро» (Russia)	Система «СПЕКТР»	40–160 кГц
HVPD (Great Britain)	HVPD Longshot	0–200 МГц
ООО DIMRUS (Russia)	«AR-700»	30–300 кГц
UE SYSTEMS INC. (USA)	«Ultraprobe»	20–100 кГц
Doble Engineering Company (USA)	«DFA-100»	1,0 кГц–1,0 МГц

При этом все приборы позиционируются как универсальные, предназначенные для обследования трансформаторов всех конструкций и мощностей.

Частичный разряд представляет собой локальный лавинный разряд в газовой поре диэлектрика или пробой малых объемов твердого или жидкого диэлектрика [8]. Большое разнообразие влияющих факторов и условий возникновения определяет широкий диапазон частот электромагнитных и акустических сигналов, сопровождающих ЧР.

Акустические сигналы ЧР охватывают звуковой и ультразвуковой диапазоны частот.

Звуковой диапазон до 1 кГц неприемлем для использования, поскольку в нем имеется множество акустических помех, обусловленных вибрацией электромагнитной системы трансформатора на гармониках промышленной частоты, а также работой вспомогательных устройств, например маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения[2].

Верхнюю границу частотного диапазона при практических измерениях определяют в пределах от 500 до 700 кГц[3]. Ти-

[1] IEC 60270(2000) High-voltage test techniques. Partial discharge measurements.

[2] Вибродиагностика трансформаторов [Сайт]: http://vibropoint.ru/vibrodiagnostika-transformatorov/

[3] Частотный диапазон для регистрации частичных разрядов [Сайт]: https://dimrus.ru/texts/freqpd.html

повым значением верхней границы считается 600 кГц [9].

Для систем мониторинга, использующих внутренние, встроенные в бак трансформатора датчики [10], такое значение верхней границы частотного диапазона может быть оправданным. Однако большинство приборов используют датчики, устанавливаемые на внешней стороне бака трансформатора [5, 6, 7]. При этом высокочастотные ультразвуковые сигналы испытывают сильное затухание вследствие рассеяния, отражения и поглощения в многослойной конструкции [11]. Завышенное значение верхней границы частотного диапазона измерений ведет к неоправданному усложнению и удорожанию измерительной аппаратуры, резко повышает требования к качеству акустического контакта датчика и поверхности бака трансформатора.

Задачей настоящего исследования является обоснованное определение верхней f_1 и нижней f_2 границ частотного диапазона для практического измерения акустических сигналов ЧР в реальных условиях.

Определение четких границ частотного диапазона позволит выработать единые требования к метрологическим характеристикам измерительной аппаратуры, минимизировать ее стоимость и сосредоточить внимание исследователей на разработке методик диагностирования высоковольтных силовых трансформаторов.

Методы исследования. Маслонаполненные высоковольтные силовые трансформаторы имеют различную конструкцию и толщину стенок бака. Стальные стенки бака покрываются слоем краски, внутри – маслостойкой, снаружи – антикоррозийной. Толщина слоев может варьироваться в некоторых пределах. Таким образом, трансформатор с точки зрения распространения акустического сигнала представляет собой многослойную структуру. Каждый из слоев имеет акустический импеданс, определяемый его геометрией и физическими свойствами. Импеданс каждого отдельного слоя и всей многослойной структуры зависит от частоты сигнала.

Для теоретических исследований был выбран коэффициент пропускания, который определяет долю амплитуды акустического сигнала, прошедшего через многослойную структуру:

$$W = \frac{A_1}{A_0},$$

где A_0 – амплитуда падающего акустического сигнала; A_1 – амплитуда прошедшего акустического сигнала.

Коэффициент пропускания W является функцией частоты акустического сигнала f. Получив зависимость $W(f)$, можно выделить диапазон частот, в которых ЧР могут регистрироваться с наибольшей эффективностью. Для получения зависимости $W(f)$ использовалась импедансная математическая модель [12] многослойной структуры.

В модели приняты следующие допущения:

1) источник ЧР является точечным и находится в изотропной среде с известными акустическими свойствами (ближнее полупространство);

2) стенка бака трансформатора представляется бесконечной плоскостью;

3) каждый из слоев стенки бака однороден по толщине и акустическим свойствам;

4) для регистрации сигнала используется измерительный преобразователь, имеющий идеальный акустический контакт с поверхностью (дальнее полупространство).

Исходными данными для расчета являются:

– количество слоев n;

– толщины слоев d_j;

– скорости акустических колебаний в каждом слое c_j;

– плотность каждого слоя ρ_j;

– скорость акустических колебаний в ближнем полупространстве c_0;

– плотность ближнего полупространства ρ_0;

– скорость акустических колебаний в дальнем полупространстве c_{n+1};

– плотность дальнего полупространства ρ_{n+1}.

Коэффициент пропускания по амплитуде для колебаний с частотой f рассчитывается в следующем порядке.

1. Задаются численные значения исходных данных для расчета.

2. Рассчитывается импеданс ближнего полупространства:

$$Z_{\text{ВХ}}^{0} = \rho_0 c_0 .$$

3. Рассчитывается входной акустический импеданс каждого слоя от 1 до n:

$$Z_{\text{ВХ}}^{j} = \frac{Z_{\text{ВХ}}^{j-1} - i\,Z_j\,tg\left(k_j d_j\right)}{Z_j - i\,Z_{\text{ВХ}}^{j-1}\,tg\left(k_j d_j\right)} Z_j\,,$$

где $Z_j = \rho_j\,c_j$ – акустический импеданс j-го слоя; $k_j = (2\pi f)/c_j$ – волновое число j-го слоя.

4. Рассчитывается коэффициент пропускания по амплитуде для фиксированной частоты f:

$$W = \prod_{j=1}^{n} \frac{Z_{\text{ВХ}}^{j} + Z_j}{Z_{\text{ВХ}}^{j} + Z_{n+1}}\, e^{i \cdot k_j d_j}\,,$$

где $Z_{n+1} = \rho_{n+1} c_{n+1}$ – акустический импеданс дальнего полупространства.

Для получения зависимости $W(f)$ расчет коэффициента пропускания повторяется для набора частот из исследуемого диапазона 0–600 кГц.

Результаты исследования. На рис. 1 графически отображены результаты расчета коэффициента пропускания для различных толщин стальной стенки бака от 4 до 10 мм. В расчетах принималось, что толщина слоев маслостойкой и антикоррозийной краски одинакова и составляет 1 мм.

На зависимостях рис. 1 можно условно выделить две области: низкочастотную и высокочастотную. В низкочастотной области (до 200 кГц) расположены первые максимумы зависимостей $W(f)$, в высокочастотной области (свыше 200 кГц) находятся второй и последующие максимумы. При этом максимумы коэффициента пропускания в низкочастотной области имеют существенно меньший разброс по частоте, чем в высокочастотной области.

Опыт практических измерений показывает, что при конструировании или выборе измерительной аппаратуры для диагностирования действующего оборудования рационально ориентироваться на низкочастотную область. Это связано с тем, что при измерениях в высокочастотной области резко повышаются требования к качеству акустического контакта датчика с поверхностью бака. В реальных условиях при измерениях на действующем оборудовании обеспечить такой контакт чрезвычайно сложно, в том числе по условиям безопасности. Многие промышленно выпускаемые регистраторы ЧР предполагают использование магнитных креплений датчиков, особенностью которых является сильное демпфирование акустических колебаний на высоких частотах.

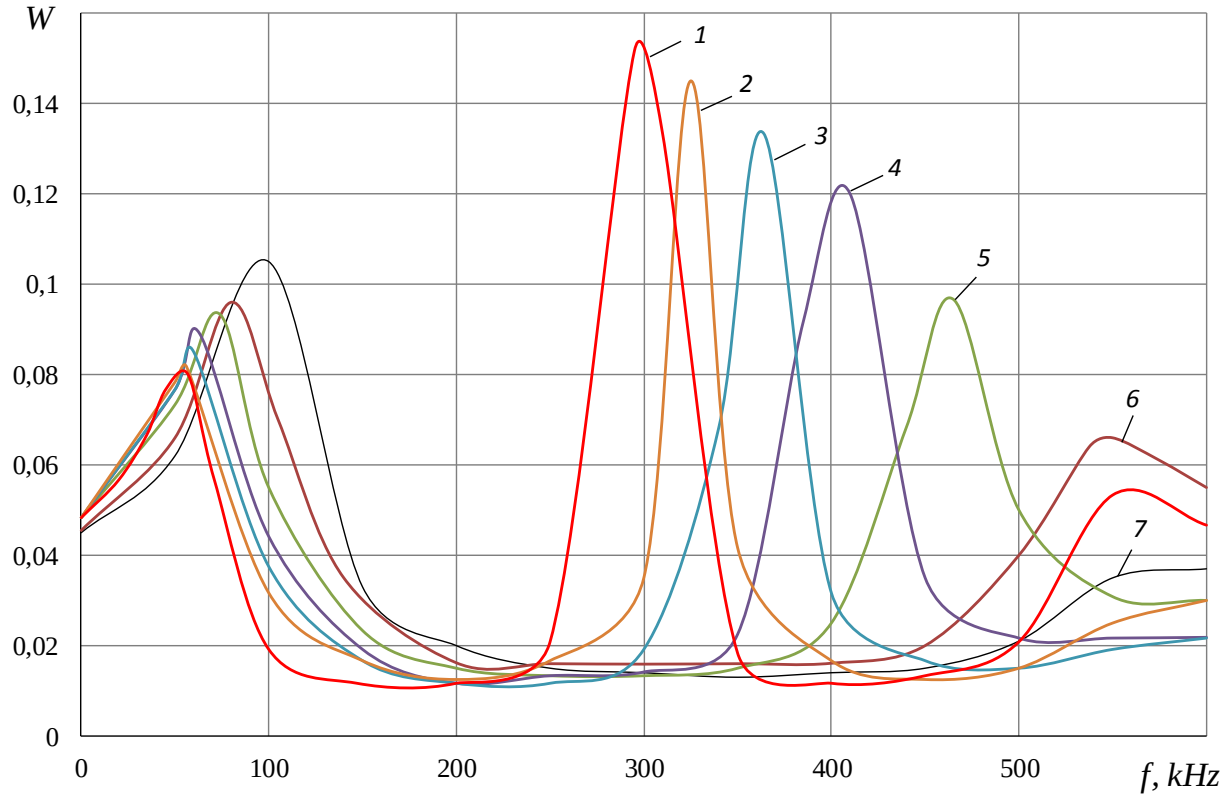

Рис. 1. Расчетные зависимости коэффициента пропускания по амплитуде от частоты при разных толщинах стали бака: 1 – 10 мм; 2 – 9 мм; 3 – 8 мм; 4 – 7 мм; 5 – 6 мм; 6 – 5 мм; 7 – 4 мм

Другим значимым фактором является то, что с ростом частоты возрастает затухание акустического сигнала в жидком диэлектрике – трансформаторном масле [11]. Анализ спектральных распределений, полученных в реальных условиях, показывает, что при использовании внешних датчиков уровень сигнала в высокочастотной области достаточно мал и соизмерим с уровнем помех [7].

Используем общепринятое определение полосы пропускания как диапазона частот, в котором изменения исследуемой величины W не превышают $\sqrt{2}/2$ от ее максимального значения W_m (рис. 2).

В табл. 2 приведены границы f_1 и f_2, а также ширина полосы пропускания Δf для различных толщин стали стенок бака исследуемой модели в низкочастотной области.

Исходя из данных табл. 2, в качестве нижней границы выделяемого диапазона можно принять наименьшее значение частоты f_1 = 21 кГц, а в качестве верхней границы – наибольшее значение частоты f_2 = 112 кГц.

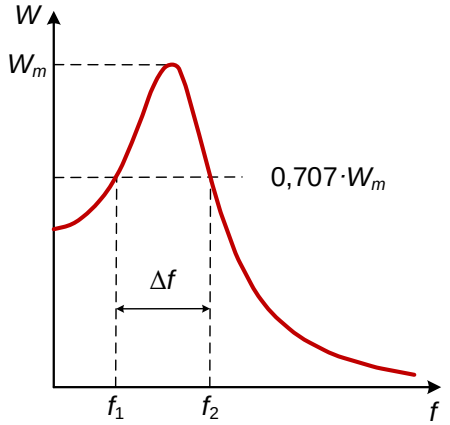

Рис. 2. Полоса пропускания в низкочастотной области: f_1 – нижняя граница; f_2 – верхняя граница; Δf – ширина полосы пропускания

Таблица 2. **Результаты расчета границ и диапазона частот в зависимости от толщины стали стенки бака**

Толщина стали бака, мм	f_1, кГц	f_2, кГц	Δf, кГц
4	60	112	52
5	51	102	51
6	43	93	50
7	35	85	50
8	31	80	49
9	24	76	52
10	21	68	47

Исследования модели показали, что вариация толщины слоев краски оказывает малое влияние на характер зависимости $W(f)$ в низкочастотной области и значительное влияние в высокочастотной области. Этот факт является еще одним аргументом в пользу выбора низкочастотной области.

С учетом вариации толщины слоев краски и стенки бака для измерений можно рекомендовать расширенный диапазон частот с f_1 = 20 кГц и f_2 = 120 кГц. Ширина полосы пропускания при этом составляет Δf = 100 кГц.

Выводы. Низкочастотная область более предпочтительна для измерения акустических сигналов ЧР внешними датчиками в целях контроля технического состояния высоковольтного оборудования.

Диапазон 20–120 кГц можно рекомендовать в качестве рабочей области частот при выборе или создании средств измерений акустических сигналов ЧР, а также при поиске диагностических признаков состояния изоляции в маслонаполненном высоковольтном оборудовании.

Выбор рекомендованного диапазона позволяет исключить влияние звуковых помех, минимизировать возможную вариацию геометрических параметров трансформатора на прохождение акустического сигнала, повысить эффективность измерения за счет учета акустических свойств объекта.

С учетом принятых в модели допущений рекомендованные границы частотного диапазона являются начальным приближением и могут служить основой для дальнейшего, более глубокого исследования вопроса с учетом конструктивных особенностей высоковольтных силовых трансформаторов, режимов их работы, локализации дефектов изоляции и других факторов.

Список литературы

1. **Barnikas R.** Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2002. – Vol. 9, No. 5. – P. 763–808.

2. **Вдовико В.П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007.

3. **Rusov V.A.** Measurement of partial discharges in insulation of high-voltage equipment. – Yekaterinburg, 2011. – 368 p.

4. **Экспериментальное** определение частичных разрядов в макете цифрового измерительного трансформатора дифференциальным методом / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, С.Н. Литвинов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 2. – С. 32–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.032-042.

5. **Sikorski W., Walczak K.** Power transformer diagnostics based on acoustic emission method // Acoustic emission–research and applications. – 2013. – Vol. 1. – P. 1–13. DOI: 10.5772/55211.

6. **Markalous M., Tenbohlen S., Feser K.** Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2008. – Vol. 15, No. 6. – P. 1576–1583.

7. **Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А.** Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 48–54. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54

8. **Коробейников С.М., Вечеркин М.В.** Физика возникновения, характеристика и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – № 18. – С. 204–212.

9. **ShuJin Steven Tsai.** Power Transformer Partial Discharges (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis, Modeling and Simulation. – Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2002.

10. **Alison K. Lazarevich**. Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor. – Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2003.

11. **Голямина И.П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

12. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. – 2-е изд. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

References

1. Barnikas, R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, vol. 9, no. 5, pp. 763–808.

2. Vdoviko, V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnostics of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007.

3. Rusov, V.A. Measurement of partial discharges in insulation of high-voltage equipment. Yekaterinburg, 2011. 368 p.

4. Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D., Litvinov, S.N. Eksperimental'noe opredelenie chastichnykh razryadov v makete tsifrovogo izmeritel'nogo transformatora differentsial'nym metodom [Experimental determination of partial discharges in a digital measuring transformer layout by differential method]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 32–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.032-042.

5. Sikorski, W., Walczak, K. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. *Acoustic emission–research and applications*, 2013, vol. 1, pp. 1–13. DOI: 10.5772/55211.

6. Markalous, M., Tenbohlen, S., Feser, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, vol. 15, no. 6, pp. 1576–1583.

7. Nikolaev, An.A., Khramshina, E.A., Nikolaev, Ar.A. Lokalizatsiya neispravnostey transformatora sredstvami akusticheskoy lokatsii chastichnykh razryadov [Transformer Fault Location by Means of Partial Discharges Acoustic Radar]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2018, no. 1(38), pp. 48–54. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54

8. Korobeynikov, S.M., Vecherkin, M.V. Fizika vozniknoveniya, kharakteristika i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of occurrence, characteristics and classification of partial discharges in highvoltage equipment]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2010, no. 18, pp. 204–212.

9. ShuJin Steven Tsai. Power Transformer Partial Discharges (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis, Modeling, and Simulation. Blacksburg, Virginia, U.S.A, 2002.

10. Lazarevich, Alison K. Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor. Blacksburg, Virginia, U.S.A, 2003.

11. Golyamina, I.P. *Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya* [Ultrasound. A little encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1979. 400 p.

12. Brekhovskikh, L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow: Nauka, 1973. 343 p.