

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 621.314.212:620.111.3
DOI 10.17816/transsyst202064161-171

© **В. Т. Черемисин, А. А. Кузнецов, М. А. Волчанина, А. В. Горлов**
Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИМИТАТОРА ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обоснование: В статье приведено описание устройства имитации дефектов для совместного использования с системами акустического контроля высоковольтных трансформаторов.

Цель: экспериментальные исследования мобильного устройства имитации дефектов силовых трансформаторов; определить параметры импульсов, имитирующих различные дефекты изоляции

Методы: разработка технических средств имитации дефектов изоляции; экспериментальные исследования; определение параметров сигналов, имитирующих дефекты.

Результаты: приведена структурная схема устройства имитации дефектов; проведены экспериментальные исследования устройства имитации дефектов; рассчитана мощность импульсов, имитирующих различные дефекты изоляции высоковольтных трансформаторов.

Заключение: Предложенное устройство вырабатывает высоковольтные импульсы, имитирующие различные дефекты изоляции высоковольтных трансформаторов. Приведены параметры акустических сигналов.

Ключевые слова: высоковольтные трансформаторы, диагностирование изоляции, акустический метод, устройство имитации дефектов, параметры сигналов.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field “Electrical Engineering”

© **V. T. Cheremisin, A. A. Kuznetsov, M. A. Volchanina, A. V. Gorlov**
Omsk State Transport University (OSTU)
(Omsk, Russia)

MEASURING THE ACOUSTIC SIGNALS PARAMETERS OF THE DEFECT SIMULATOR OF POWER TRANSFORMERS

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231 [Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90231].

Background: The article describes a device for simulating defects for use with acoustic control systems for high-voltage transformers.

Aim: experimental research of a mobile device for imitation of power transformer defects; determine the parameters of impulses simulating various insulation defects

Methods: development of technical means for imitation of insulation defects; experimental research; determination of parameters of signals simulating defects.

Results: a block diagram of a device for imitating defects is shown; experimental studies of the device for imitating defects were carried out; the power of pulses simulating various defects in the insulation of high-voltage transformers was calculated.

Conclusion: The proposed device generates high-voltage pulses that simulate various defects in the insulation of high-voltage transformers. The parameters of acoustic signals are given.

Key words: high-voltage transformers, traction power supply, insulation parameters diagnostics of high voltage transformers, acoustic method, partial discharges, device for imitation defects, signal parameters.

ВВЕДЕНИЕ

При диагностировании силовых трансформаторов в системе электроснабжения железных дорог используется достаточно большое количество методов электрического и неразрушающего контроля. Применение акустических методов позволяет выполнить локацию мест возникновения и наличия дефектов изоляции при работе силовых трансформаторов [1–3]. Применение средств акустического контроля существенно повышает достоверность и быстродействие применяемого в настоящее время хроматографического метода контроля растворенных газов в трансформаторном масле.

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы выявил наличие большого количества работ, посвященных методам и способам диагностирования высоковольтного оборудования [5–15].

Недостатками применяемых акустических методов при контроле трансформаторов и другого высоковольтного оборудования является распознавание вида контролируемого дефекта и локация места его положения.

При помощи метода акустического контроля возможна регистрация частичных разрядов (ЧР), регистрация их количества в единицу времени, регистрация амплитуд, формы сигналов и других параметров. По каждому событию возможен визуальный анализ, подтверждающий наличие именно ЧР и их параметров. Кроме того по разности времени прихода сигналов к датчикам акустической антенны, установленных на корпусе трансформатора, возможно установление координат предполагаемого места возникновения ЧР.

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Для устранения указанных выше недостатков было предложено использование устройства имитации дефектов в маслонаполненном оборудовании [1]. При использовании устройства имитации дефектов в методике акустического контроля измерения параметров акустических сигналов выполняются в одинаковых условиях на имитаторе и контролируемом оборудовании. Снижаются дополнительные погрешности, вызываемые влиянием окружающей среды и возможные изменения коэффициентов усиления измерительного тракта в различные интервалы времени при проведении контроля.

Структурная схема устройства имитации дефектов представлена на Рис. 1.

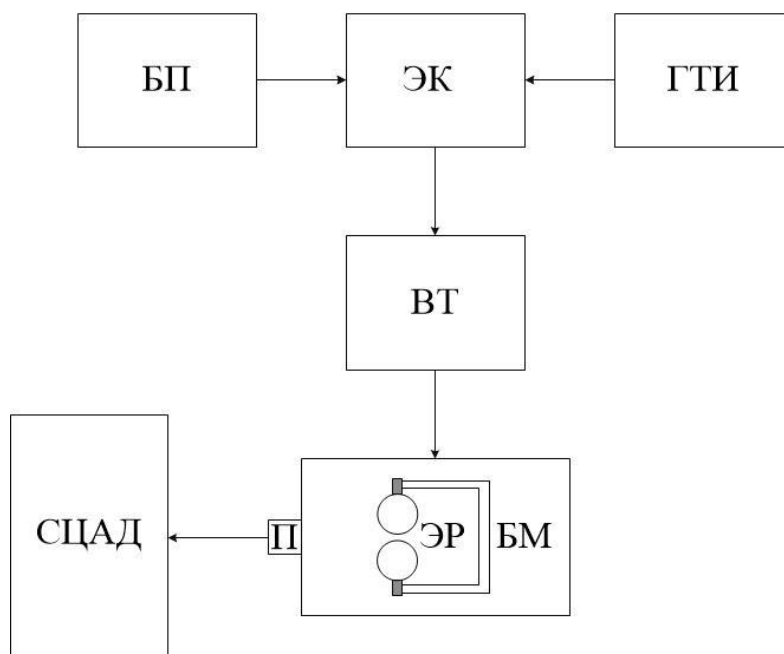


Рис. 1. Структурная схема устройства имитации дефектов

БП – блок питания;

ЭК – электронный коммутатор;

ГТИ – генератор тактовых импульсов;

ВТ – высоковольтный трансформатор;

СЦАД – система цифровая акустико-эмиссионная диагностическая;

П – преобразователь акустический;

ЭР – электрический разрядник;

БМ – бак маслонаполненный.

Устройство вырабатывает высоковольтные импульсы, имитирующие различные дефекты изоляции высоковольтных трансформаторов. Электронный коммутатор (ЭК) подает на высоковольтный трансформатор (ВТ) постоянное напряжение с задержкой, формируемой конденсатором в его составе. На электрический разрядник (ЭР) поступают высоковольтные

импульсы с частотой, вырабатываемой генератором тактовых импульсов (ГТИ) в интервале от 0 до 10 кГц. Электрический разрядник может работать в различных средах – воздух или трансформаторное масло.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На Рис. 2 показана схема расположения электрического разрядника в масляном баке. Для дозирования мощности разряда выполнялось регулирование постоянного напряжения БП и расстояние между электродами ЭР – Δn при помощи регулирующего механизма на кронштейне 4.

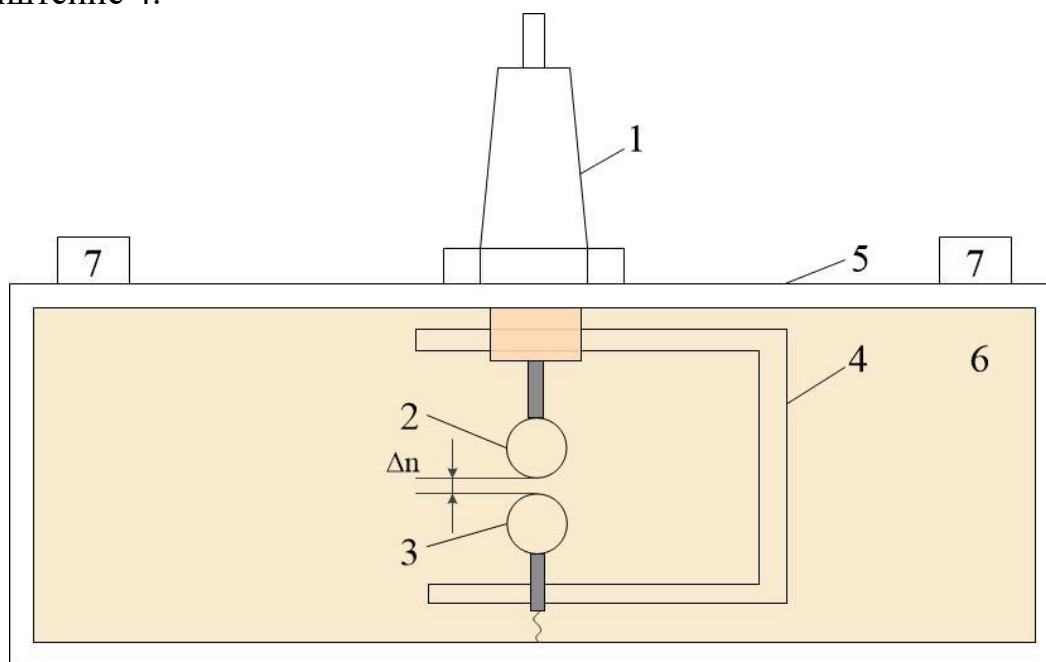


Рис. 2. Схема расположения электрического разрядника в масляном баке

- 1 – изолятор;
- 2, 3 – электроды;
- 4 – кронштейн;
- 5 – корпус маслonaполненного бака;
- 6 – трансформаторное масло;
- 7 – преобразователь акустический.

Корпус имитатора дефектов выполнен из стали и к нему подключен один из электродов разрядника ЭР и нулевой потенциал БП. Колебания звуковой волны воспринимают четыре акустических преобразователя П, представляющих собой акустическую антенну.

Схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника на верхней крышке устройства приведена на Рис. 3.

На Рис. 3 приведены следующие параметры устройства: $L_0=8$ см – расстояние от акустического преобразователя АП₀ до электрического

разрядника; $L_1=18$ см – расстояние от акустического преобразователя Π_1 до электрического разрядника; $L_2=28$ см – расстояние от акустического преобразователя Π_2 до электрического разрядника; $L_3=23$ см – расстояние от акустического преобразователя Π_3 до электрического разрядника.

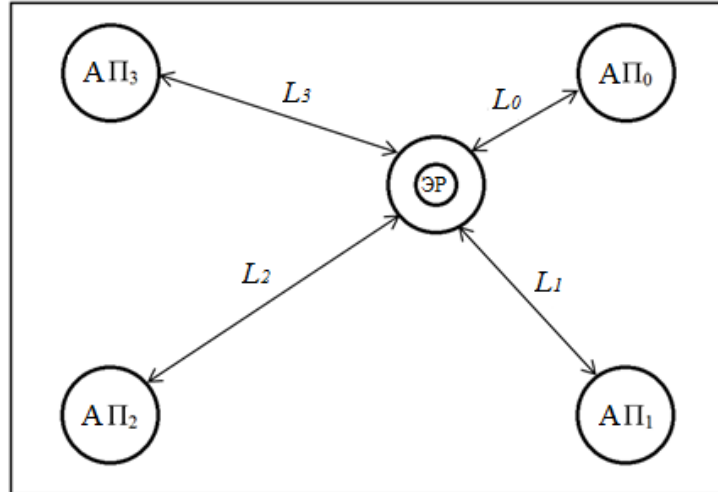


Рис. 3. Схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника

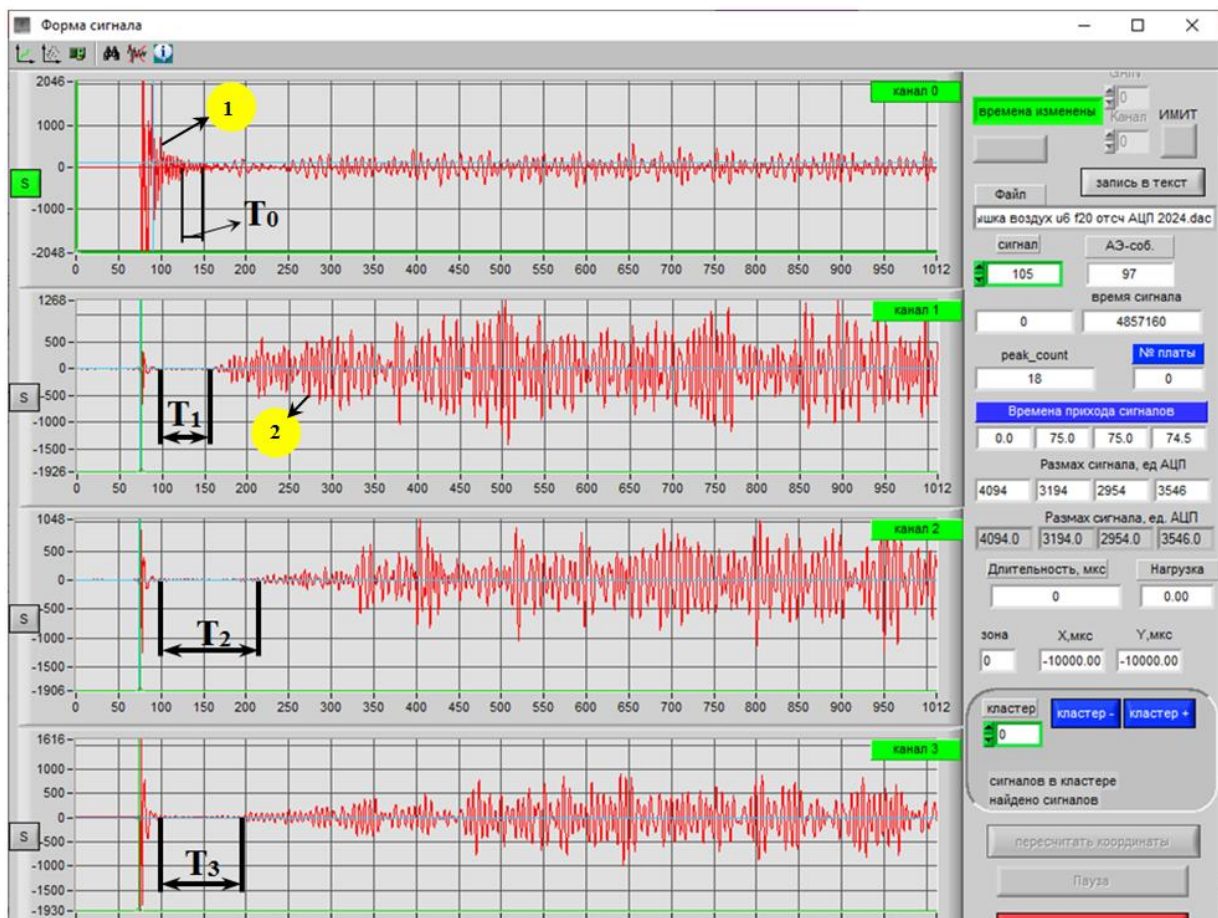


Рис. 4. Сигналы от четырех акустических преобразователей

Акустические преобразователи АП₀ – АП₃ располагали на верхней крышке устройства имитации дефектов на различном расстоянии $L_0 – L_3$ от ЭР. При помощи системы акустической типа СЦАД-16 были зарегистрированы импульсы различной мощности при различной частоте следования, представленные на Рис. 4–6.

На Рис. 4 показаны сигналы от четырех АП. Сигнал представлен двумя областями: высокочастотный импульс 1 при возникновении электрического разряда и низкочастотные колебания корпуса отраженных волн – 2. Из рисунка так же хорошо видна разность времен прихода (РВП) $T_0 – T_3$ для преобразователей с разными координатами $L_0 – L_3$. При этом изменяются мощность электрического разряда, имитирующего дефект. Электрические разряды пропадают при выходном напряжении БП $U = 3$ В и усиливаются до максимального значения при $U_{п} = 15$ В.

На Рис. 5–6 показаны сигналы, различной мощности, сформированные при изменении выходного напряжения на БП.

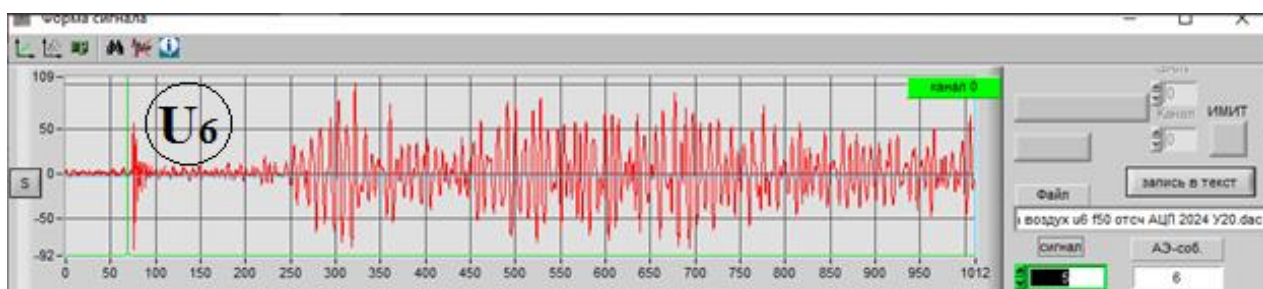


Рис. 5. Сигнал от акустического преобразователя
($U = 6$ В; $f = 50$ Гц; $k_y = 20$; отсч. АЦП = 2024; $T_k = 1012$ мкс)

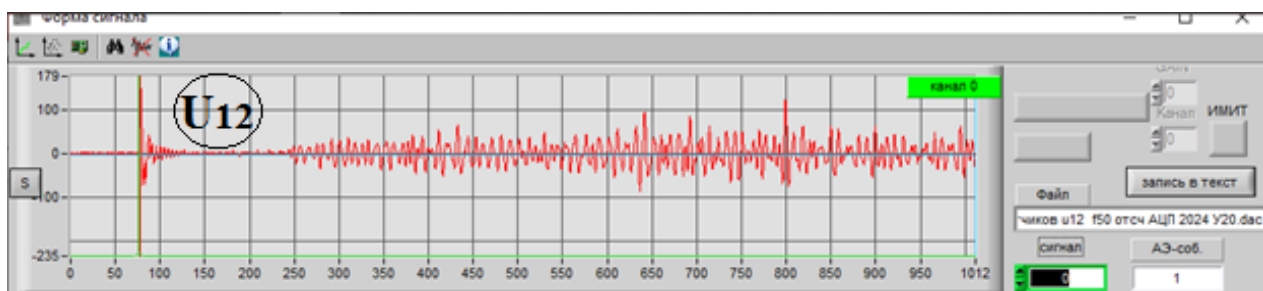


Рис. 6. Сигнал от акустического преобразователя
($U = 12$ В; $f = 50$ Гц; $k_y = 20$; отсч. АЦП = 2024; $T_k = 1012$ мкс)

Мощность импульса, ограниченного временным окном $T = 60$ мкс определялась по формуле:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (1)$$

Число отсчетов АЦП для указанного окна составляло 120 ед.

Для двух сигналов приведенных на Рис. 5, 6 были получены значения $P_6 = 26,9$ ед.; $P_{12} = 62,8$ ед. соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что эти параметры можно использовать для оценки мощности разрядов диагностируемого оборудования.

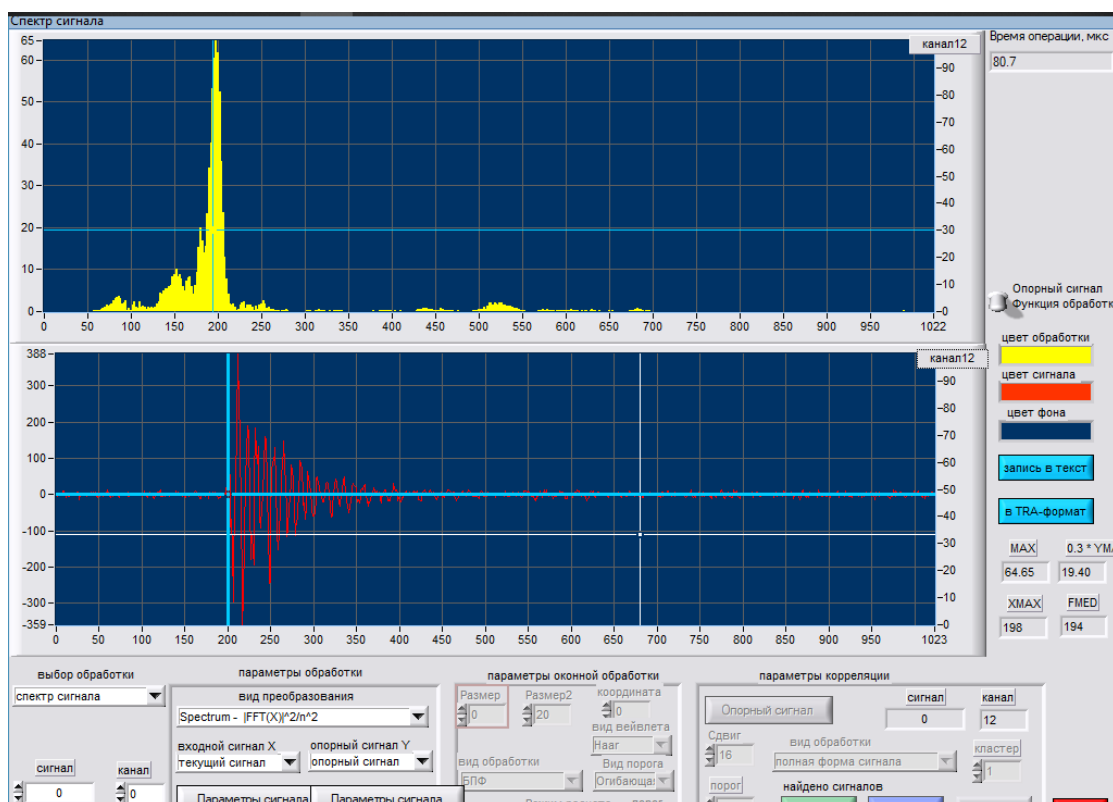


Рис. 7. Временной сигнал акустического импульса и его спектр ($U = 12$ В; $f = 100$ Гц; $k_y = 20$; отсч. АЦП = 2024; $T_k = 1023$ мкс)

Совместное использование имитатора дефектов со средствами контроля позволит с большей достоверностью распознавать тип дефекта и его мощность.

Таблица. Измеренные параметры акустических сигналов

Напряжение U, В	Частота следования эл. имп. F, Гц	Размах амплитуд, ед.	Средняя частота акуст. импульсов $f_{ср}$, кГц	Мощность импульса P, ед.
3	50	86	217	12,1
6		149	223	26,9
9		283	209	43,3
12		414	201	62,8
3	100	94	325	16,7
6		168	313	30,1
9		502	218	82,4
12		747	207	103,2

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведена информация по разработке и экспериментальным исследованиям устройства имитации дефектов изоляции высоковольтных трансформаторов. Показаны осциллограммы с формой импульсов для различной мощности электрических разрядов. Приведены количественные значения сигналов, измеренные акустическим методом, имитирующие дефекты с различной мощностью.

ВЫВОДЫ

Применение представленного устройства позволит сопоставлять сигналы, измеренные на высоковольтном оборудовании с сигналами имитатора, что позволит повысить достоверность контроля и принятия правильных решений об их техническом состоянии.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. 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. [Kuznetsov AA, Kuzmenko AYu., Kuznetsova MA, Simakov AV. Opredelenie porogovih znachenii pri diagnostirovani izoliiacii visokovoltного oborudovaniya metodami registracii chastichnih razriadov. *Omskii nauchiy vestnik*, 2019;2(164):30-35. (In Russ.)]. Доступно по: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2019/pmt/2_164_2019/30-35.pdf. Ссылка активна на: 07.12.2020.
2. Taha IBM, Dessouky SS, Ghaly RNR, Ghoneim SSM. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*; 2020, 12 p. [Internet]. [cited 2020 Dec 07]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820304282>.
3. МУ 1.3.3.99.0038-2009 Диагностика силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов. Методические указания ОАО «Концерн Росэнергоатом» № 126, 2009. – 73 с. [Diagnostika silovykh transformatorov, avtotransformatorov, shuntiruiushchikh reaktorov i ikh vvodov. Metodicheskie ukazaniia ОАО “Kontserna Rosenergoatom”. 2009:126:73 (In Russ.)]. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293724/4293724794.pdf>
4. Markalous SM, 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;15:1576-1583 [Internet]. [cited 2020 Dec 07]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4712660>.
5. Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В. Статистические характеристики частичных разрядов как диагностические признаки состояния изоляции высоковольтного оборудования // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 2. – С. 59–65. [Shakhnin VA, Chebryakova YuS, Mironenko YaV. Statisticheskie harakteristiki chastichnih razriadov kak diagnosticheskie priznaki sostoyaniay izoliiacii visokovoltного oborudovaniya: *Kontrol. Diagnostika*, 2015; 2: 59-65. (In Russ)]. Доступно по: <http://www.td-j.ru/index.php/archive/529-059-065/>. Ссылка активна на: 07.12.2020.
 6. Strachan SM, Rudd S, McArthur SDJ, et al. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008;15:259-268 [Internet]. [cited 2020 Dec 07]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/3341015_Knowledge-based_diagnosis_of_partial_discharges_in_power_transformers.
 7. Вдовико В.П. Характеристики частичных разрядов и их применение в оценке качества электрической изоляции высоковольтного оборудования // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2005. – № 5. – С. 23–26. [Vdoviko VP. Kharakteristiki chastichnykh razryadov i ikh primeneniye v otsenke kachestva elektricheskoi izolyatsii vysokovoltного oborudovaniya. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*, 2005;5:23-26. (In Russ.)]. Доступно по: <https://readera.org/read/142173958>. Ссылка активна на: 07.12.2020.
 8. Ермаков Е.Г. Методика измерения частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2009. – № 2(78). – С. 47–52. [Ermakov EG. Metodika izmereniya chastichnykh razryadov v izolyatsii silovykh transformatorov. *Nauchno-tekhnicheskije vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009;2(78):47-52. (In Russ.)]. Доступно по: https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/volume/N2_78_2009.PDF Ссылка активна на: 07.12.2020.
 9. Максудов Д.В., Федосов Е.М. Методы селекции сигналов частичных разрядов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – № 2 (12). – С. 138–143. [Maksudov DV, Fedosov EM. Metody seleksii signalov chastichnykh razryadov. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009;2(12):138-143. (In Russ.)]. Доступно по: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1241/1078>. Ссылка активна на: 07.12.2020.
 10. Lopez-Roldan J, Tang T, Gaskin M. Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*; 2008;15:1634-1639 [Internet]. [cited 2020 Dec 07]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4712667>.
 11. Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Девятков Д.Х., и др. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локации частичных разрядов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – №1(37). – С. 105–108. [Karandaev AS, Evdokimov SA, Devyatov DH., et al. Diagnostirovanie silovykh transformatorov metodom akusticheskoi lokatsii chastichnykh razriadov. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2012; 1(37): 105-108. (In Russ.)]. Доступно по: http://vestnik.magtu.ru/images/data_base/2012_1/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%8

- 2%D0%BD%D0%B8%D0%BA_2012_1_%D1%81_105-108.pdf Ссылка активна на: 07.12.2020.
12. Фазуллин С.Р. Диагностика силовых трансформаторов методом измерения частичных разрядов // Теория и практика высоких технологий в промышленности. Сборник статей международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 96–98. [Fazullin SR. Diagnostika silovykh transformatorov metodom izmereniia chastichnykh razriadov. *Teoriia i praktika vysokikh tekhnologii v promyshlennosti. Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2017:96-98. (In Russ.)]. Доступно по: Ссылка активна на: <https://docplayer.ru/78608179-Teoriya-i-praktika-vysokih-tehnologiy-v-promyshlennosti.html> 07.12.2020.
 13. Bartnikas R. Partial discharges their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2002;9:763-808 [Internet]. [cited 2020 Dec 07]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1038663>
 14. Поляков Д.А., Шамганов Э.Б., Никитин К.И., Терещенко Н.А. Анализ эффективности регистрации частичных разрядов с использованием индуктивных и емкостных датчиков // Промышленная энергетика. – 2019. – № 12. – С. 30 – 35. [Polyakov DA, Shamganov EB, Nikitin KI, Tereshchenko NA. Analiz effektivnosti registratsii chastichnykh razriadov s ispolzovaniem induktivnykh i emkostnykh datchikov. *Promyshlennaia energetika*, 2019;12:30-35. (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/article/view/1321>. Ссылка активна на: 07.12.2020.
 15. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле // Электротехника. – 2019. – № 4. – С. 48–54. [Davidenko IV, Ovchinnikov KV. Identifikatsiia defektov transformatorov po analizu gazov, rastvorenykh v masle. *Elektrotehnika*, 2019;4:48-54. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37246280>. Ссылка активна на: 07.12.2020.

Сведения об авторах:

Черемисин Василий Титович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 7843-0765; ORCID: 0000-0002-4576-2223;
E-mail: eps@omgups.ru

Кузнецов Андрей Альбертович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Волчанина Мария Андреевна, аспирант;
eLibrary SPIN: 2130-4637; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

Горлов Антон Вячеславович, аспирант;
ORCID: 0000-0002-8413-6612;
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

Information about the authors:

Vasily T. Cheremisin, Doctor of Technical Science, professor;
eLibrary SPIN: 7843-0765; ORCID: 0000-0002-4576-2223;
E-mail: eps@omgups.ru

Andrey A. Kuznetsov, Doctor of Technical Science, professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Maria A. Volchanina, PhD student;
eLibrary SPIN: 2130-4637; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

Anton V. Gorlov, PhD student;
ORCID: 0000-0002-8413-6612
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

Цитировать:

Черемисин В. Т., Кузнецов А. А., Волчанина М. А., Горлов А. В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 161–171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171

To cite this article:

Cheremisin VT, Kuznetsov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):161-171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171