

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst678377>

© А.А. Кузнецов, А.В. Пономарев

Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель. Статья посвящена проектированию системы мониторинга состояний силовых трансформаторов, которая будет хранить и систематизировать результаты хроматографического анализа растворенных газов и акустического контроля состояния изоляции и выводов силовых трансформаторов.

Материалы и методы. Получение данных о состоянии силового трансформатора предлагается выполнять существующими методами, но для их передачи, хранения и анализа предлагается использовать проектируемую автоматизированную систему, которая работает на базе технологии .NET и системы управления базами данных SQLite.

Результаты. Представлена структура базы данных, алгоритмы получения и обработки диагностических данных, шаблоны формируемых отчетов. Разработана структура интерфейса пользователя системы, а также основной функционал.

Заключение. Разрабатываемая система позволит повысить эффективность управления системой электроснабжения железнодорожного транспорта за счет удобного представления актуальных данных о текущем состоянии контролируемых трансформаторов и динамике его изменения.

Ключевые слова: силовые трансформаторы; диагностика; автоматизированная система; мониторинг состояния; база данных; хроматография; акустический контроль; отчетность.

Как цитировать:

Кузнецов А.А., Пономарев А.В. Проектирование автоматизированной системы мониторинга состояний силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 318–331. doi: 10.17816/transsyst678377

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **A.A. Kuznetsov, A.V. Ponomarev**

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

DESIGN OF AUTOMATED SYSTEM TO MONITOR POWER TRANSFORMER STATES

AIM. The paper discusses the design of a power transformer monitoring system, which will store and systematize the chromatography of dissolved gases and acoustic control of insulation and terminals of power transformers.

MATERIALS AND METHODS. It is proposed to collect data on power transformer states using existing methods. However, it is proposed to use the designed automated system based on .NET technology and the SQLite database management system to transmit, store, and analyze the data.

RESULTS. The paper presents the database structure, algorithms used to collect and process test data, and templates of the generated reports. The authors developed the structure of the system user interface and basic capabilities.

CONCLUSION. The developed system will improve the control performance of the railway power supply system due to the convenient presentation of relevant data on the current state of the controlled transformers and its changes.

Keywords: power transformers; testing; automated system; state monitoring; database; chromatography; acoustic control; reporting.

To cite this paper:

Kuznetsov AA, Ponomarev AV. Design of Automated System to Monitor Power Transformer States. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):318–331. doi: 10.17816/transsyst678377

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное получение информации о фактическом состоянии силовых трансформаторов является важным условием обеспечения безопасности и эффективности перевозочного процесса [1].

В настоящее время для определения состояния трансформаторов применяются различные методы и по каждому из них формируются свои массивы хранимых данных, что усложняет процесс сопоставления результатов анализа. Поэтому разработка автоматизированной системы, позволяющей собирать, хранить и удобно отображать результаты диагностики состояния трансформатора различными методами является актуальной задачей [2, 3].

Разрабатываемая система должна обладать рядом характеристик:

- надежность хранения собранных данных;
- оперативность получения информации (особенно о снижении ресурса трансформатора) [4, 5];
- высокая информативность, благодаря которой обеспечивается гибкость формируемых отчетов о состоянии контролируемых участков.

Для реализации этих требований необходимо разработать структуру хранения данных, связи между данными [6–8].

СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ

В данной работе для хранения данных предлагается реализовать семь взаимосвязанных таблиц.

Базовая таблица «Трансформаторы» описывает основные параметры контролируемых силовых трансформаторов. По ней можно получать наиболее быстрым способом краткую актуальную информацию о состоянии трансформатора. Данные о принадлежности трансформатора (какой службе ЭЧ принадлежит) и его размещении (на какой тяговой подстанции ЭЧЭ расположен) представлены в таблицах «ЭЧ» и «ЭЧЭ», позволяющих структурировать выводимые данные.

По уникальному полю-ключу «id_Трансформатора» таблица, кратко описывающая состояние трансформатора, связана с таблицами, хранящими данные по всем исследованиям данного трансформатора. Благодаря такой организации хранения данных в любой момент времени оператору становятся доступны следующие динамически формируемые данные:

- дата и результат последнего исследования;
- общее количество измерений за все время;

- количество измерений за определенный период;
- результаты последних N измерений, чтобы посмотреть динамику изменения ресурсного состояния трансформатора.

Предлагаемая структура базы данных представлена на Рис. 1.



Рис. 1. Предлагаемая структура базы данных
АК – акустический контроль;
ХАРГ – хроматографический анализ растворенных газов

Fig. 1. Proposed database structure

ПРОГРАММНЫЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Пример отображения информации в главном окне проектируемой системы мониторинга состояний силовых трансформаторов, реализованный на платформе .NET, приведен на Рис. 2 [9–11].

В верхней части окна выпадающими списками представлена краткая информация об имеющихся трансформаторах, результаты их последних проверок и запланированные даты последующих проверок. Внизу окна

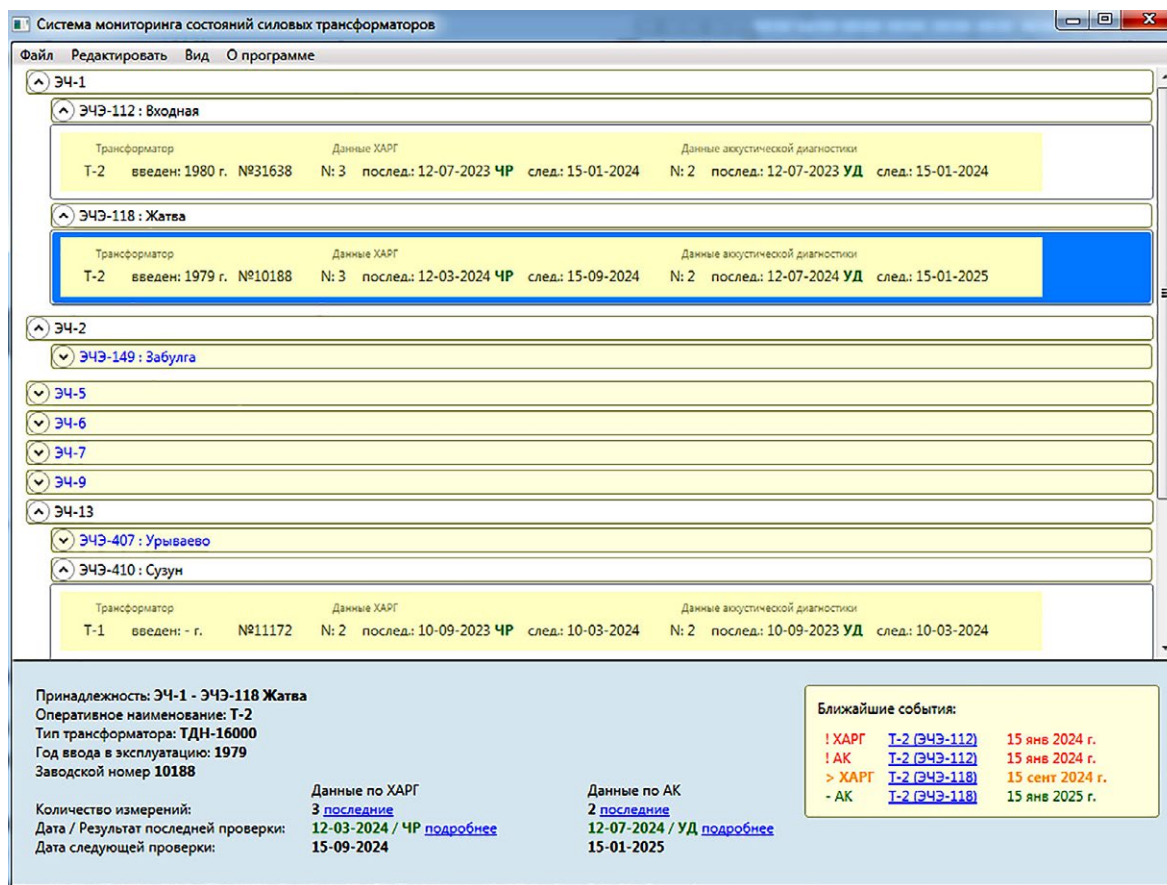


Рис. 2. Главное окно системы мониторинга состояний силовых трансформаторов

Fig. 2. Main window of the system for monitoring the state of power transformers

отображается более подробная информация о конкретном выбранном трансформаторе. Также имеется возможность наблюдать ближайшие запланированные даты проверок по всей базе данных трансформаторов.

При отображении более подробной информации о конкретном силовом трансформаторе имеется возможность отобразить подробные результаты последнего исследования, либо увидеть результаты множества последних измерений, что позволяет отследить динамику изменения тех или иных контролируемых параметров. Примеры таких отчетов приведены ниже.

С целью повышения надежности решение о ресурсном состоянии силового трансформатора предлагается принимать по итогам двух исследований:

- хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в масле;
- акустический контроль (АК) состояния изоляции и вводов силового трансформатора.

ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МАСЛЕ

ХАРГ позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях появления, определять их вид и степень развития [12, 13]. Для выполнения диагностики требуется произвести отбор масла, что в свою очередь требует отключения питания трансформатора и приводит к перерывам в работе участков контактной сети, и доставить образец в дорожную химико-техническую лабораторию (ДХТЛ).

В результате анализа выявляются количественные характеристики примесей и сравниваются с граничными значениями для данного типа трансформаторов. Полученные данные отправляются в дорожную электротехническую лабораторию (ДЭЛ) и вводятся в предлагаемую базу данных. Передача данных может быть осуществлена удаленно по радиоканалу или имеющимся кабельным линиям связи, но сама процедура анализа занимает в среднем около одного месяца и проводится не реже одного раза в полугодие. Однако при появлении критических значений контролируемых

Принадлежность:	ЭЧ-1, ЭЧЭ-118 Жатва	
Оперативное наименование:	Т-2	
Тип трансформатора:	ТДН-16000	
Год ввода в эксплуатацию:	1979	
Заводской номер:	10188	
Дата отбора пробы:	12.03.2024	
Результат диагностики:	Частичные разряды	
Дата следующего отбора:	15.09.2024	
Наличие газа	Граничная концентрация	Фактический результат
Двуокись углерода (CO ₂): пл / без пл	0,400 / 0,800	0,05809
Метан (CH ₄)	0,01	0,00371
Этан (C ₂ H ₆)	0,005	0,00036
Этилен (C ₂ H ₄)	0,01	0,00034
Ацетилен (C ₂ H ₂)	0,001	0,00047
Оксид углерода (CO)	0,05	0,000787
Водород (H ₂)	0,01	0,02703
Кислород (O ₂)	-	6,56028
Азот (N)	-	15,09557
Влагосодержание	25 г/т	
Горючие газы	0,05	

Рис. 3. Пример подробного представления результата ХАРГ

Fig. 3. Sample of chromatography analysis results detailed representation

параметров сроки проверки могут быть существенно сокращены вплоть до двух недель.

В базе данных предлагается хранить данные ХАРГ-исследований по каждому трансформатору для получения истории изменения диагностических параметров и более обоснованного определения даты следующей проверки. Предлагаемая дата следующей проверки как итог диагностики по ХАРГ хранится в таблице «Измерения ХАРГ» для каждого измерения. Но фактическое планирование и утверждение даты следующей проверки по ХАРГ с учетом множества внешних факторов будет выполнять оператор разрабатываемой системы, и эта дата хранится в таблице «Трансформаторы» и позволяет реализовывать удобные сигнализирующие события в системе.

Пример подробного представления одиночного результата ХАРГ приведен на Рис. 3, а отображение нескольких результатов в динамике – на Рис. 4.

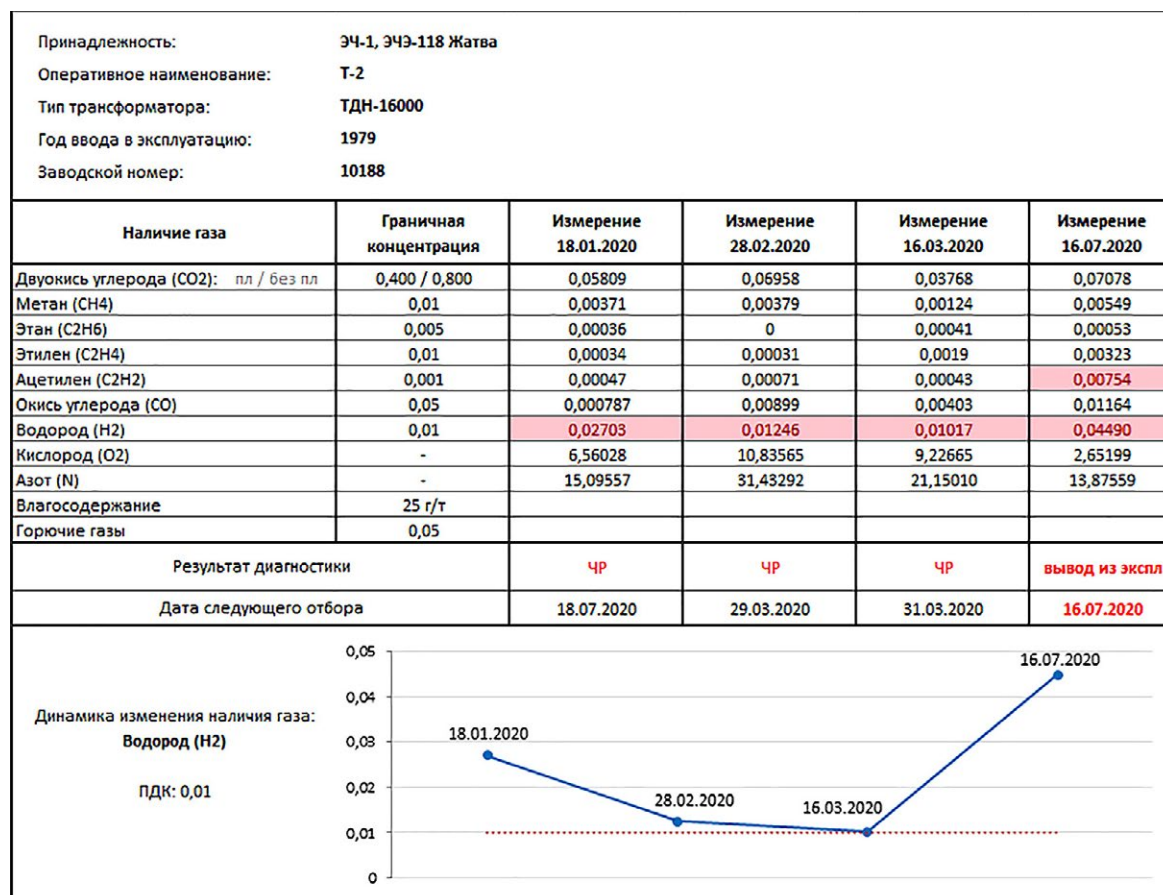


Рис. 4. Пример представления результатов ХАРГ в динамике

Fig. 4. Sample of dynamic chromatography analysis results representation

Результатами диагностики могут быть различные выявленные дефекты: частичные разряды (ЧР), дуговые разряды (ДР), повреждение твердой изоляции (ПТИ), межвитковые замыкания (МВЗ) и другие. Наличие и степень выраженности этих дефектов определяют следующую дату проверки.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ВВОДОВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вторым способом мониторинга состояния силовых трансформаторов является применение акустической системы контроля состояния изоляции и вводов трансформаторов [14, 15]. В этом случае к поверхности бака высоковольтного трансформатора при помощи магнитов крепится некоторое количество акустических датчиков. Каждый из них фиксирует акустические колебания, возникающие на стенках бака из-за появления частичных разрядов (ЧР) в обмотках трансформатора. Одновременная фиксация колебаний несколькими датчиками, расположенными в различных местах поверхности позволяет:

- получать более четкий и мощный сигнал на датчике, наиболее близком к источнику ЧР;
- определять координаты источника ЧР расчетным путем по данным нескольких датчиков.

Полученная информация может напрямую передаваться в ДЭЛ и вноситься в базу данных. Однако объем передаваемых данных будет необоснованно велик, поэтому в настоящей системе предлагается использовать предварительную обработку полученных данных:

- данные со всех датчиков сохраняются на жестком диске (путь к данным фиксируется в базе данных) и проходят предварительную обработку (определяются средние значения амплитуд сигналов, количество зафиксированных событий);
- из всех датчиков выбирается тот, который фиксирует данные с наибольшей амплитудой;
- в базе данных фиксируется положение выбранного датчика;
- сигналы с выбранного датчика обрабатываются на основе математического аппарата рядов Фурье и вейвлет-анализа. Полученные спектры, скейлограммы и усредненный сигнал с выбранного датчика также фиксируются в базе данных;

- полученный усредненный сигнал сравнивается с эталонами различных дефектов, в результате чего формируется решение о ресурсном состоянии изоляции силового трансформатора и предлагаемой даты следующей проверки.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для предварительной обработки полученных данных реализуется соответствующий программный модуль [16], графическая схема алгоритма (ГСА) работы которого укрупненно представлена на Рис. 5. Подзадача «Обработка сигналов четырех каналов» представлена на Рис. 6. Итогом работы модуля будут данные, подготовленные для передачи на сервер и сохранения в базе данных.

Таким образом, в базе данных всегда будет наиболее востребованная и актуальная информация, включающая в себя положение наиболее подходящего датчика, результат анализа и предлагаемую дату следующей проверки. В связанной таблице будут представлены сам (усредненный) сигнал и результаты его обработки (спектры, скейлограммы), статистические характеристики и ссылка на хранилище данных со всех оставшихся датчиков.

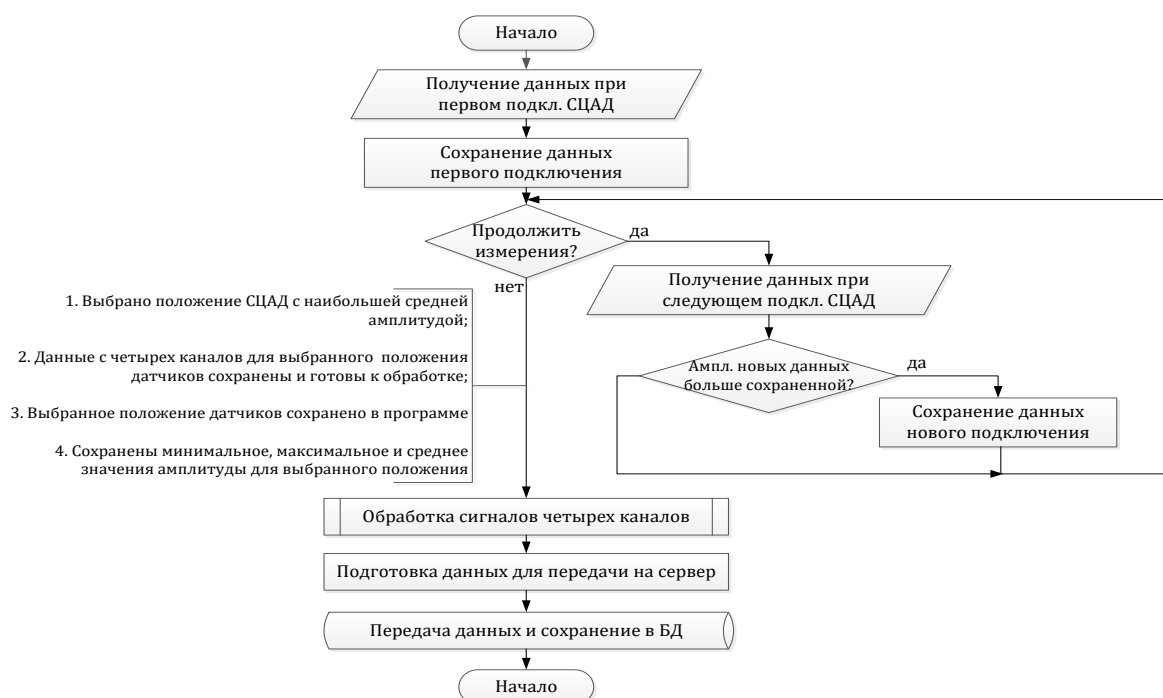


Рис. 5. ГСА работы модуля предварительной обработки акустических данных

Fig. 5. Diagram of acoustic data preprocessing module algorithm



Рис. 6. ГСА обработки сигналов акустических датчиков при выбранном расположении

Fig. 6. Processing algorithm diagram for signals from selected position of acoustic sensors

Сама передача данных в ДЭЛ может быть выполнена непосредственно от трансформатора при помощи переносной системы цифровой акустической диагностики (СЦАД) по радиоканалу или соответствующей линии связи.

Диагностику с использованием АК предлагается также выполнять через определенные временные интервалы (в среднем один раз в полгода).

Пример представления результатов акустического контроля в базе данных представлен на Рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В итоге получилось сформировать основную структуру и логику работы проектируемой автоматизированной системы мониторинга

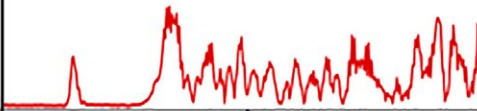
Принадлежность:	ЭЧ-1, ЭЧЭ-118 Жатва	
Оперативное наименование:	Т-2	
Тип трансформатора:	ТДН-16000	
Год ввода в эксплуатацию:	1979 (тех.обсл. 2020)	
Заводской номер:	10188	
Дата проведения АК:	12.03.2024	
Положение датчиков:	Со стороны пути, верх, центр	
Результат АК:	Частичные разряды	
Критичность дефекта:	25%	
Ответственный оператор:	Иванов И. И.	
Дата следующего отбора:	15.09.2024	
Параметр	Ед. измерения	Значение
Количество событий	шт	72
Длительность измерения	сек	30
Частота	событий / сек	2,40
Минимальная амплитуда	ед. АЦП	170
Средняя амплитуда	ед. АЦП	420
Максимальная амплитуда	ед. АЦП	1540
Усредненный временной срез скейлограммы вейвлет-преобразования		
Совпадение с эталоном	пробой изоляции	60%
Детальные изображения:	средний сигнал	открыть
	спектр Фурье	открыть
Файл данных	\\LocalStorage\240312 10188 a1.zip	

Рис. 7. Пример представления результата акустического контроля

Fig. 7. Sample of acoustic analysis results representation

состояний силовых трансформаторов; определить структуру базы данных и формируемых на ее основании отчетов.

ВЫВОДЫ

Разрабатываемая система позволит более оперативно отслеживать возникновение критических состояний диагностируемых трансформаторов, принимать обоснованные решения на основе актуальной информации о текущем состоянии контролируемых трансформаторов и о динамике изменения их состояния.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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
2. Патент РФ на изобретение № 2779269 / 05.09.22. Бюл. №25. Волчанина М.А., Горлов А.В., Еркебаев А.Ж., Кузнецов А.А. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. EDN: FJZXPX
3. Патент РФ на изобретение № 2615790 / 11.04.17. Бюл. № 11. Храмшин В.Р., Карандаев А.С., Храмшин Р.Р., и др. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. EDN: ATZCEC
4. 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. EDN: KRRWJT
5. 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. С. 1576-1583. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
6. Шубочкина М.Р. Анализ современных СУБД в контексте общемировых тенденций. В кн.: Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы»; Апрель 1, 2024. Орел, 2024. С. 225-232.
7. Рыбальченко Д.И., Сухоруков С.С. Выбор реляционной системы управления базами данных для проекта В кн.: Международная научно-практическая конференция «Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки»; Май 17, 2023. Москва, 2023. С. 67-68.
8. Валеева Л.С. Сравнительный анализ SQL и NOSQL баз данных // Региональная студенческая научно-практическая конференция «Молодые нефтяники»; Апрель 18, 2024. Альметьевск, 2024. С. 129-130.
9. Тюкачев Н.А., Хлебостроев В.Г. С#. Алгоритмы и структуры данных. Санкт-Петербург: Лань, 2023.
10. Унгер А.Ю. Паттерны проектирования на C++. Москва: РТУ МИРЭА, 2023.

11. Рихтер Д. CLR via C#: Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. Санкт-Петербург: Питер, 2019.
12. Виноградов Л.В., Игнатъев Е.Б., Овсянников Г.В., Попов Г.В. Хроматографический анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2013.
13. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле // Электротехника. 2019. № 4. С. 48-54. EDN: NUQRAM
14. Taha I.B.M., Dessouky S.S., Ghaly R.N.R., Ghoneim S.S.M. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. P. 4759-4769.
15. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., et al. Monitoring the technical condition of power transformers using acoustic diagnostics // South Ural State University Bulletin. 2008. Vol. 26. P. 26-31.
16. Гресова А.С., Селедцова А.М. ВПФ технологии в разработке программных решений. В кн.: Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технологии: исследования, разработки и их использование в комплексной подготовке специалистов»; Апрель 22–26, 2024. Невинномысск, 2024. С. 182-188.

REFERENCES

1. 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. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst202064161-171
2. Patent RUS № 2779269/ 05.09.22. Byul. №25. Volchanina MA, Gorlov AV, Erkebaev AZh, Kuznetsov AA. *Ustrojstvo dlja monitoringa silovyh transformatorov*. (In Russ.) EDN: FJZXPX
3. Patent RUS № 2615790/ 11.04.17. Byul. № 11. Hramshin VR, Karandaev AS, Hramshin RR, et al. *Ustrojstvo dlja monitoringa silovyh transformatorov*. (In Russ.) EDN: ATZCEC
4. Vdoviko VP. Kharakteristiki chastichnykh razryadov i ikh primenenie v otsenke kachestva elektricheskoi izolyatsii vysokovoltnogo oborudovaniya. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*. 2005;5:23-26. (In Russ.) EDN: ATZCEC
5. 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. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
6. Shubochkina MR. Analysis of modern DBMS in the context of global trends. In: *Proceedings of the Russian science conference « Tsifrovyye instrumenty obespecheniya ustoychivogo razvitiya ekonomiki i obrazovaniya: novyye podkhody i aktual'nyye problemy»*; 2024 Apr 1. Orel; 2024:225-232. (In Russ.)

7. Rybal'chenko DI, Sukhorukov SS. Selecting a Relational Database Management System for a Project. In: *Proceedings of the international science conference «Issledovaniye razlichnykh napravleniy sovremennoy nauki: yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki»*; 2023 May 17. Moscow; 2023:67-68. (In Russ.)
8. Valeyeva LS. Comparative analysis of SKL and NOSYAL databases. In: *Proceedings of the regional student scientific and practical conference “Molodyye neftyaniki”*; 2024 Apr 18. Al'met'yevsk; 2024:129-130. (In Russ.)
9. Tyukachev NA, Khlebostroyev VG. C#. *Algorithms and data structures*. St. Petersburg: Lan; 2023. (In Russ.)
10. Unger AYU. *Design Patterns on C++*. Moscow: RTU MIREA; 2023. (In Russ.)
11. Rihter D. *CLR via C#: Programming on the platform Microsoft.NET Framework 4.5 in language C#*. St. Petersburg: Piter; 2019. (In Russ.)
12. Vinogradov LV, Ignat'yev YeB, Ovsyannikov GV, Popov GV. *Chromatographic analysis of dissolved gases in transformer diagnostics*. Ivanovo: IGEU im VI Lenina; 2013. (In Russ.)
13. Davidenko IV, Ovchinnikov KV. Identification of Transformer Defects via Analyzing Gases Dissolved in Oil. *Elektrotekhnika*. 2019;4:48-54. (In Russ.) EDN: NUQRAM
14. 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;59: 4759-4769.
15. Karandaev AS, Evdokimov SA, Karandaeva OI, et al. Monitoring the technical condition of power transformers using acoustic diagnostics. *South Ural State University Bulletin*. 2008;26:26-31.
16. Gresova AS, Seledtsova AM. VPF technologies in the development of software solutions. In: *Proceedings of the international scientific and practical conference “Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: issledovaniya, razrabotki i ikh ispol'zovaniye v kompleksnoy podgotovke spetsialistov”*; 2024 Apr 22-26. Nevinnomyssk; 2024:182-188. (In Russ.)

Сведения об авторах:

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

Пономарев Антон Витальевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402;
E-mail: antonyswork@gmail.com

Information about the authors:

Andrey A. Kuznetsov, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Anton V. Ponomarev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402
E-mail: antonyswork@gmail.com