

ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**О.О. Кривоконева, Р.И. Кудояров, Е.Ю. Мавлекаев,
Е.М. Коныс, И.В. Прахов, А.С. Хисматуллин**

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета,
г. Салават, Россия*

Оценка технического состояния оборудования электрических станций и подстанций сопряжена с высокой степенью износа электросетевого оснащения, что влияет на состояние и режимы работы оборудования. Степень этих взаимовлияний и их закономерности возможно установить только лишь при общей оценке состояния всего оборудования электросетевого объекта. Подбор рациональной системы ремонта силовых масляных трансформаторов распределительных подстанций предполагает собою проблему с множественными переменными, основанную на концепции надежности, старения, возобновления и промышленной диагностики. В работе рекомендуется провести комплексный способ организации ремонта, базирующийся на индивидуальном наблюдении Потребителем за изменениями технического состояния оборудования в ходе эксплуатации и количественной оценке технического состояния трансформаторов по совокупности диагностических параметров.

Ключевые слова: техническое состояние трансформатора, электроснабжение, дефекты, контроль, ремонт.

Современные крупные промышленные предприятия обычно представляют сложную техническую систему, одним из опасных производственных объектов которой являются силовые масляные трансформаторы, состояние которых влияет на производительность и безопасность технологических процессов. Силовой трансформатор в энергосистеме является одним из основных компонентов, обуславливающих надежность электроснабжения. Необходимость эксплуатации силовых трансформаторов с длительным сроком службы (превышающим предположительный срок в 1,5–2 раза) считается характерной особенностью экономического развития энергетики РФ в настоящее время и в запланированном будущем [1–4]. Улучшение концепции гарантийного обслуживания трансформаторов с длительным сроком службы выдвигает задачи поддержания их функциональности и надежности электроснабжения в целом. Один из основных путей поддержания надежности в подобных ситуациях является организация эффективного контроля состояния используемого оборудования. Техническая оценка состояния оборудования в электрических станциях и подстанциях считается актуальной задачей.

Создание рациональной системы ремонта масляных трансформаторов

Необходима объективная оценка «паркового» ресурса масляных трансформаторов как в рамках отрасли, так и в рамках определенных энергетических организаций. При этом следует оценить расходы на продление срока службы

трансформаторов, так как срок службы оснащения может быть увеличен до паркового только после выполнения профилактических ремонтных работ.

Создание рациональной системы ремонта электрооборудования и силовых масляных трансформаторов распределительных подстанций представляет собой комплексную проблему с многочисленными переменными с применением теории надежности, усталостного разрушения, восстановления и промышленной диагностики. Сущность такого рода концепции технического обслуживания и ремонта состоит в том, что по истечении конкретного проработанного периода в момент планируемого отказа проводят различного рода профилактические работы. Чем меньше во времени интервал между моментом прогнозируемого отказа и выполнения надлежащего профилактического воздействия на оборудование, тем эффективнее система ремонта. Применительно к электрооборудованию важно установить, какие характеристики регулировать и какие условия принимать во внимание при оценке его технического состояния.

Вывод силовых масляных трансформаторов распределительных подстанций в ремонт осуществляется на базе принципов функционирующей системы ППР и нормативных документов. Поэтому необходимо обратить внимание на существующие системы технического обслуживания и ремонта, а также общую оценку состояния надежности силовых масляных трансформаторов распределительных подстанций [5–21].

Статистическая обработка данных о дефектах при эксплуатации трансформаторов

Проведенные исследования с 2007 по 2017 г. 100 трансформаторов с наработкой более 20 лет, эксплуатирующихся на крупных предприятиях нефтегазового комплекса г. Салавата, позволили выявить более 1300 дефектов, вид и место которых приведены в табл. 1 и 2.

В табл. 1 приведена статистика распределения повреждений силовых трансформаторов по классам напряжений, при этом их число составило: 27 % для 35 кВ; 47 % для 110 кВ; 21 % для 220 кВ; 2 % для 330 кВ; 3 % для 500 кВ.

Как видно из табл. 1, максимальную повреждаемость имеют: упуск трансформаторного масла – 26 %, высоковольтные вводы – 25 %, обмотки – 19 %, устройства РПН – 14 %, течи – 11 %, что подтверждает вышесказанное.

На рис. 1 и в табл. 3 показан «возрастной состав» трансформаторов.

Только в 30 случаях необходимо заменить трансформатор целиком либо его обмотки. Опыт обследований демонстрирует, что более 70 % повреждений могут быть обнаружены без отключения трансформатора от сети.

Обнаружить одновременно все типы дефектов невозможно, поэтому основной интерес уделяется

раскрытию наиболее часто встречающихся и наиболее опасных для работоспособности трансформатора повреждений.

Одним из основных методов оценки технического состояния масляных трансформаторов является хроматографический анализ, позволяющий по результатам обследования обнаружить дефекты оборудования на ранней стадии их развития, определять характер дефектов и степень имеющихся повреждений.

Количественную оценку технического состояния трансформаторов предлагаем осуществлять по совокупности диагностических параметров, представленных в виде интегрального критерия, формируемого искусственной нейронной сетью с использованием программного обеспечения.

Предлагаемое решение

В качестве решения задачи обеспечения надежности силовых масляных трансформаторов предлагается уделить внимание существующим системам технического обслуживания и ремонта, а также общей оценке состояния надежности силовых масляных трансформаторов распределительных подстанций. Учитывая стоимость ремонта трансформаторов, более разумно проводить капитальные ремонты более обоснованно и как можно реже. Для решения этой проблемы предлагается

Таблица 1

Статистика распределения числа повреждений
силовых трансформаторов по классам напряжений за 2007–2017 гг.

	35 кВ	100 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	Всего Σ
Обмотки	128	98	19	2	0	248
Магнито-провод	0	0	4	2	0	6
Система охлаждения	10	31	16	4	6	67
РПН	7	111	51	2	10	181
Вводы	52	160	87	6	14	319
Течь масла	31	61	41	6	8	147
Упуск масла	118	154	53	4	4	332
Итого	347	615	270	26	42	1300

Таблица 2

Дефекты силовых масляных трансформаторов

Вид дефекта	Количество	Доля (%)
Неисправность блинкера	21	4
Отсутствует заземление	30	6
Дефекты в устройстве РПН	10	2
Недостаток масла	79	15
Неисправность измерительных приборов	23	4
Неисправность конструкции	39	7
Нарушение герметичности	60	11
Течь масла	176	33
Повреждения в ШАОТ	40	7
Загрязнение	61	11

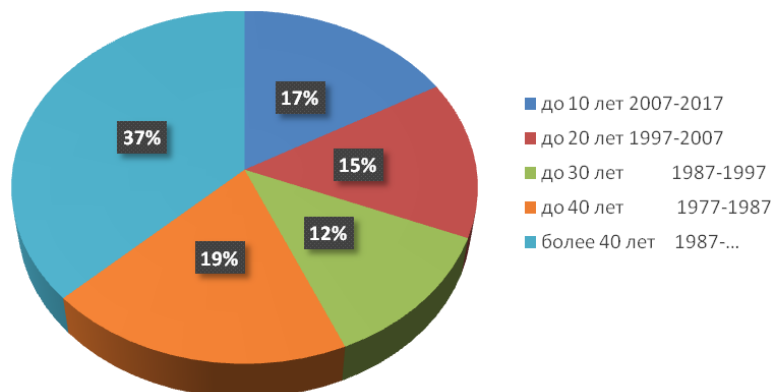


Рис. 1. Распределение трансформаторов по срокам службы

Таблица 3

Число дефектов трансформаторов по срокам службы

Дефекты	Возраст трансформатора					
	68–50	50–40	40–30	30–20	20–10	до 10
Течь масла	47	43	32	26	17	11
Нарушение герметичности	23	15	9	7	4	2
Загрязнение	16	18	8	9	5	5
Недостаток масла	27	21	13	7	9	2
Неисправность конструкции	16	10	7	4	2	0
Итого	129	107	69	53	37	20

применение теории нечетких множеств [5] для оценки состояния трансформатора в программе MATLAB.

В программу вводятся входные параметры оборудования. К ним можно отнести сопротивление обмоток постоянному току, сопротивление изоляции трансформатора, коэффициент абсорбции. На рис. 2 представлено окно программы MATLAB.

Программа позволяет вводить входные данные (лингвистические переменные) и изменять их в зависимости от характеристик исследуемого оборудования, а также получать данные о состоянии оборудования (рис. 3).

Разработан программный комплекс на основе измерителя показателей качества электрической энергии Ресурс-UF2(M), ноутбука и специального программного обеспечения.

Программный комплекс осуществляет идентификацию технического состояния и прогнозирование ресурса безаварийной работы оборудования по совокупности параметров генерируемых трансформатором высших гармонических составляющих токов и напряжений на основе использования метода искусственных нейронных сетей. Для обучения искусственной нейронной сети применяется теория планирования эксперимента, что позволяет сформировать необходимую базу данных для обучения при существенном уменьшении количества обучающих опытов [5].

По условиям обеспечения надежности выявления диагностических параметров на фоне помех и

шумов для определения технического состояния и прогнозирования ресурса оборудования используются параметры первых десяти гармонических составляющих фазных токов и напряжений – коэффициенты гармонических составляющих токов K_{In} , коэффициенты гармонических напряжений K_{Un} , которые практически представляют собой действующие значения гармонических составляющих, нормированных к действующему значению первой гармоники, и приведенные к периоду значения углов сдвига по фазе $\varphi_{ii(n)}$ между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов и напряжений.

Совокупность нормированных значений диагностических параметров анализируется нейронной сетью. Сеть выдает результат – код возможного дефекта D и сравнивает его с данными диагностического словаря [6]:

$$D = f(K_{In}, K_{Un}, \varphi_{ii(n)}) = f(w_{I1} K_{I1} + w_{I2} K_{I2} + w_{I3} K_{I3} + \dots + w_{I10} K_{I10} + w_{U1} K_{U1} + w_{U2} K_{U2} + w_{U3} K_{U3} + \dots + w_{U10} K_{U10} + w_{\varphi1} \varphi_{ii(1)} + w_{\varphi2} \varphi_{ii(2)} + w_{\varphi3} \varphi_{ii(3)} + \dots + w_{\varphi10} \varphi_{ii(10)}), \quad (1)$$

где w – весовые коэффициенты нейронной сети для соответствующих диагностических параметров.

Для каждого вида испытания (измерения) программа рассчитывает функцию принадлежности, которая лежит в промежутке от 0 до 1. Далее программа, обрабатывая эти данные, выводит выходной параметр. Выходные параметры определяют степень работоспособности по таблице Байеса по шкале:

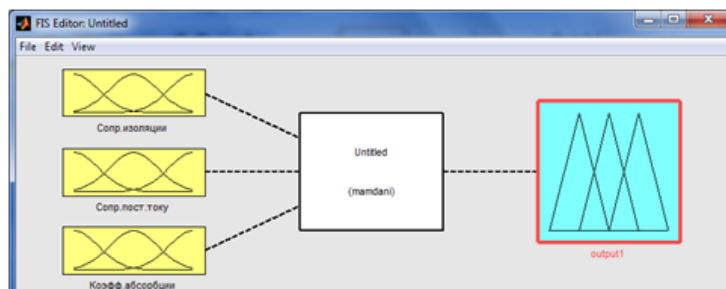


Рис. 2. Окно программы MATLAB

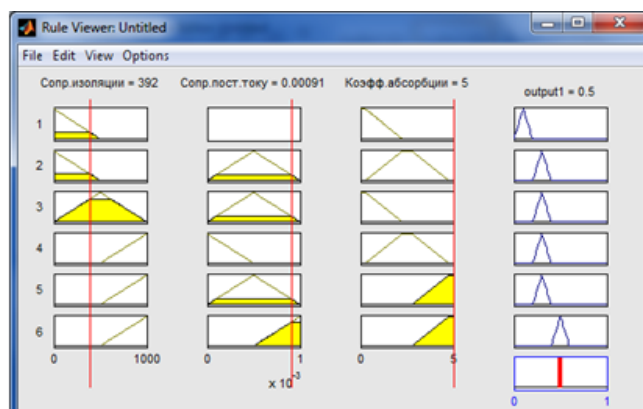


Рис. 3. Входные параметры и данные о состоянии оборудования

D-1 – работоспособное, D-2 – работоспособное, но с небольшими отклонениями; D-3 – неработоспособное, ремонтируемое; D-4 – неработоспособное.

Важным преимуществом разработанного программного комплекса является то, что он позволяет производить диагностирование работающего оборудования, а также вести удаленный контроль.

Заключение

Таким образом, применение нечеткой логики позволяет производить интегральную оценку состояния электрооборудования, что является немаловажным при планировании ремонтов оборудования. Разработанный программный комплекс позволяет обнаружить дефекты на работающем электрооборудовании на ранней стадии их развития, что не только предупреждает внезапную остановку производства в результате аварии, но и значительно снижает расходы на ремонт оборудования и увеличивает срок его службы.

Литература

1. Пат. 167206 Российская Федерация, МПК7 H01F 27/12. Установка для охлаждения масляного трансформатора / М.Г. Баширов, А.С. Хисматуллин, А.И. Переверзев; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО УГНТУ – № 2016124531/07(038517); заявл. 20.06.2016.

2. Баширов, М.Г. Интегральный критерий оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов / М.Г. Баширов, А.С. Хисматуллин, Р.У. Галлямов // Энергетик. – 2016. – № 7. – С. 24–26.

3. Рекомендации по повышению надежности электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов / М.Г. Баширов, Г.Н. Грибовский, Р.У. Галлямов и др. // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 2 (31). – С. 23–26. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-23-26

4. Применение автоматического режима контроля электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов / М.Г. Баширов, Г.Н. Грибовский, Р.У. Галлямов и др. // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – № 6. – С. 28–35.

5. Прахов, И.В. Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента / И.В. Прахов, М.Г. Баширов, А.В. Самородов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 2. – С. 14–17.

6. Прахов, И.В. Разработка программного-аппаратного комплекса для определения технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом / И.В. Прахов, М.Г. Баширов, А.В. Самородов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 3. – С. 12–16.

7. Хроматографический метод оценки технического состояния силовых и масляных трансформаторов / Л.М. Сашева, И.Ф. Зайнакова, И.Г. Хуснутдинова и др. // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 12. – С. 35–41.

8. Тепловой трансциллятор бегущей волны / А.И. Филиппов, Э.В. Мухаметзянов, А.И. Леонтьев и др. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 1. – С. 78–86.
9. Хисматуллин, А.С. Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением под воздействием вибрации / А.С. Хисматуллин, А.Х. Вахитов, А.А. Феоктистов // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 12-0. – С. 173–176.
10. Хисматуллин, А.С. Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением / А.С. Хисматуллин, А.Г. Хисматуллин, А.Р. Камалов // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 2. – С. 29–33.
11. Хисматуллин, А.С. Система охлаждения трансформаторного масла на основе трансцилляторного переноса тепла / А.С. Хисматуллин, А.Х. Вахитов, А.А. Феоктистов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 4. – С. 43–46. DOI: 10.18635/2071-2219-2016-4-43-46
12. Asadi, N. Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers / N. Asadi, H. Kelk // IEEE transactions on power delivery. – 2015. – Vol. 30, no. 6. – P. 2419–2426. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2431972
13. Dmitriev, A.V. Prospects for the use of additional cooling system for the oil-immersed transformers with thermoelectric transducers / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev // MATEC Web of Conferences 3. Ser. “2016 the 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, ICMME 2016”. – 2017. – P. 15008. DOI: 10.1051/mateconf/20179515008
14. Irungu, G.K. Transformer Condition Assessment using Dissolved Gas Analysis, Oil Testing and Evidential Reasoning Approach / G.K. Irungu, A.O. Akumu, J.L. Munda // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). – 2015. – P. 145–149. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223490
15. Makusheva, O.S. Vortical chamber for cleaning gases emitted by industrial establishments / O.S. Makusheva, A.V. Dmitriev, N.A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – Vol. 46, no. 5. – P. 330–333. DOI: 10.1007/s10556-010-9338-1
16. Koroglu, S. Diagnosis of Power Transformer Faults Based on Multi-layer Support Vector Machine Hybridized with Optimization Methods / S. Koroglu, A. Demircali // Electric power components and systems. – Vol. 44, no. 19. – P. 2172–2184. DOI: 10.1080/15325008.2016.1219427
17. Liao, R. Particle swarm optimization-least squares support vector regression based forecasting model on dissolved gases in oil-filled power transformers / R. Liao, H. Zheng, S. Grzybowski // Electric power systems research. – 2011. – Vol. 81, no. 12. – P. 2074–2080. DOI: 10.1016/j.epsr.2011.07.020
18. Nigmatulin, R.I. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles / R.I. Nigmatulin, A.I. Filippov, A.S. Khismatullin // Thermophysics and aeromechanics. – 2012. – Vol. 19, no. 4. – P. 589–606. DOI: 10.1134/S0869864312040075
19. Xu, W. Fault diagnosis of power transformers: Application of fuzzy set theory, expert systems and artificial neural networks / W. Xu, D. Wang, Z. Zhou // IEE proceedings-science measurement and technology. – 1997. – Vol. 144, no. 1. – P. 39–44. DOI: 10.1049/ip-smt:19970856
20. Wang, Y. Changes to the Vibration Response of a Model Power Transformer with Faults / Y. Wang, J. Pan // International journal of acoustics and vibration. – 2016. – Vol. 21, no. 4. – P. 478–485. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4443
21. Zhang, Y. An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis / Y. Zhang, X. Ding, Y. Liu // IEEE transactions on power delivery. – 1996. – Vol. 11, no. 4. – P. 1836–1841. DOI: 10.1109/61.544265

Кривоконева Ольга Олеговна, бакалавр, кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; olga-elchenko@rambler.ru.

Кудояров Руслан Ильдарович, бакалавр, кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; kudoayarovruslan@mail.ru.

Мавлекаев Евгений Юрьевич, бакалавр, кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; giltanasheal@mail.ru.

Коньс Еркнатат Магзомулы, бакалавр, кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; hism5az@mail.ru.

Прахов Иван Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; priwan@yandex.ru.

Хисматуллин Азат Салаватович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават; hism5az@mail.ru.

Поступила в редакцию 31 мая 2017 г.

EXTENSION OF SERVICE LIFE OF OIL TRANSFORMERS WITH LONG-TERM OPERATION

O.O. Krivokoneva, olga-elchenko@rambler.ru,
R.I. Kudoyarov, kudoyarovruslan@mail.ru,
E.Yu. Mavlekaev, giltanasheal@mail.ru,
E.M. Konys, hism5az@mail.ru,
I.V. Prakhov, priwan@yandex.ru,
A.S. Khismatullin, hism5az@mail.ru

Branch of Ufa State Petroleum Technological University, Salavat, Russian Federation

Technical condition evaluation performed for the equipment of power stations and substations is associated with a high wear level of power supply infrastructure which influences the states and modes of equipment operation. The levels of such mutual influence and its regular patterns can be determined only at the general evaluation of the state of a whole power supply facility. Selecting a rational system to repair power oil transformers at distribution substations implies a problem with multiple variables based on the concept of reliability, obsolescence, renewal and industrial diagnostics. The paper provides recommendations to organize repair in a comprehensive way based upon the Customer's individual observations over the change of equipment technical condition in the course of its operation and quantitative evaluation of the technical state of transformers on a total of diagnostic parameters.

Keywords: transformer technical state, power supply, defects, control, repair.

References

1. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Pereverzev A.I. *Ustanovka dlya okhlazhdeniya maslyanogo transformatora* [Cooling System for Oil Transformer]. Patent RF, no. 167206, 2016.
2. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Gallyamov R.U. [Integrated Criterion for Evaluation of Technical Condition of Power Oil Transformers]. *Energetik* [Power engineering], 2016, no. 7, pp. 24–26. (in Russ.)
3. Bashirov M.G., Gribovskiy G.N., Gallyamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S. [Recommendations about Increase in Reliability of Power Supply of Industrial Platform Linearly – Production Gas Trunkline Operation Center]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 2 (31), pp. 23–26. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-23-26
4. Bashirov M.G., Gribovskiy G.N., Gallyamov R.U., Khismatullin A.S. [Application of Automatic Verification Mode of Power Supply of Industrial Platform Linearly – Production Gas Trunkline Operation Center]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian Power Industry], 2016, no. 6, pp. 28–35. (in Russ.)
5. Prakhov I.V., Bashirov M.G., Samorodov A.V. [Increase of Efficiency of Use of Artificial Neural Networks in Problems of Diagnostics of the Pump-compressor Equipment Application of the Theory of Planning of Experiment]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transportation and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbons], 2011, no. 2, pp. 14–17. (in Russ.)
6. Prakhov I.V., Bashirov M.G., Samorodov A.V. [Development of Software and Hardware for Determination of the Technical Condition and Forecasting of the Safe Operation of the Pump-Compressor Equipment with an Electric Drive]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials], 2011, no. 3, pp. 12–16. (in Russ.)
7. Salieva L.M., Zaynakova I.F., Khusnutdinova I.G., Bashirov, M.G., Khismatullin A.S. [Chromatographic Method of Assessment of Technical Condition of Power and Oil Transformers]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2016, no. 12, pp. 35–41. (in Russ.)
8. Filippov A.I., Khismatullin A.S., Mukhametzyanov E.V., Leont'ev A.I. [Thermal Transducer of Running Wave]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki* [Bulletin of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Series: Natural Sciences], 2011, no. 1, pp. 78–86. (in Russ.)
9. Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A. [The study of heat transfer in industrial power transformers with gas-insulated cooling under the influence of vibration]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [The Successes of Modern Natural Science], 2015, no. 12-0, pp. 173–176. (in Russ.)
10. Khismatullin A.S., Khismatullin A.G., Kamalov A.R. [Heat Transfer Research in Industrial Power Transformers with Gas-insulated Cooling]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2017, no. 2, pp. 29–33. (in Russ.)

11. Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A. [Cooling System of Transformer Oil on the Basis of Transsilyatory Transfer of Heat]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie* [Energy Security and Energy Saving], 2016, no. 4, pp. 43–46. (in Russ.) DOI: 10.18635/2071-2219-2016-4-43-46
12. Asadi N., Kelk H. Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers. *IEEE transactions on power delivery*, 2015, vol. 30 no. 6, pp. 2419–2426. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2431972
13. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Prospects for the use of additional cooling system for the oil-immersed transformers with thermoelectric transducers. *MATEC Web of Conferences 3. Ser. "2016 the 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, ICMME 2016"*, 2017, pp. 15008. DOI: 10.1051/mateconf/20179515008
14. Irungu G.K., Akumu A.O., Munda J.L. Transformer Condition Assessment using Dissolved Gas Analysis, Oil Testing and Evidential Reasoning Approach. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2015, pp. 145–149. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223490
15. Makusheva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev N.A. Vortical chamber for cleaning gases emitted by industrial establishments. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2010, vol. 46, № 5, pp. 330–333. DOI: 10.1007/s10556-010-9338-1
16. Koroglu S., Demircali A. Diagnosis of Power Transformer Faults Based on Multi-layer Support Vector Machine Hybridized with Optimization Methods. *Electric power components and systems*, vol. 44, no. 19, pp. 2172–2184 DOI: 10.1080/15325008.2016.1219427
17. Liao R., Zheng H., Grzybowski S. Particle swarm optimization-least squares support vector regression based forecasting model on dissolved gases in oil-filled power transformers. *Electric power systems research*, 2011, vol. 81, no. 12, pp. 2074–2080. DOI: 10.1016/j.epsr.2011.07.020
18. Nigmatulin R. I., Filippov A. I., Khismatullin A. S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles. *Thermophysics and aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 589–606. DOI: 10.1134/S0869864312040075
19. Xu W, Wang D, Zhou Z. Fault diagnosis of power transformers: Application of fuzzy set theory, expert systems and artificial neural networks. *IEE proceedings-science measurement and technology*, 1997, vol. 144, no. 1, pp. 39–44. DOI: 10.1049/ip-smt:19970856
20. Wang Y., Pan J. Changes to the Vibration Response of a Model Power Transformer with Faults. *International journal of acoustics and vibration*, 2016, vol. 21 no. 4, pp. 478–485. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4443
21. Zhang Y, Ding X, Liu Y. An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis. *IEEE transactions on power delivery*, 1996, vol. 11, no. 4, pp. 1836–1841. DOI: 10.1109/61.544265

Received 31 May 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Продление ресурса масляных трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / О.О. Кривоконева, Р.И. Кудояров, Е.Ю. Мавлекаев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 60–66. DOI: 10.14529/power170307

FOR CITATION

Krivokoneva O.O., Kudoyarov R.I., Mavlekaev E.Yu., Konys E.M., Prakhov I.V., Khismatullin A.S. Extension of Service Life of Oil Transformers with Long-Term Operation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 60–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170307
