

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПРАВИТЕЛЬСТВО ОМСКОЙ ОБЛАСТИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ
ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СО РАН
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДОВ СО РАН
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ ИМ. С. Л. СОБОЛЕВА СО РАН

ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Материалы
III Международной научно-технической конференции
(23–24 апреля 2019 года, Омск, Россия)

В двух частях
Часть I

Омск
Издательство ОмГТУ
2019

УДК 621.01

ББК 34.4

П78

Научный редактор

П. Д. Балакин, д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Машиноведение» ОмГТУ

Редакционная коллегия:

Е. Г. Андреева, д-р техн. наук;

А. В. Бубнов, д-р техн. наук;

Е. Н. Еремин, д-р техн. наук;

Л. Г. Варено, д-р техн. наук;

А. Г. Козлов, д-р техн. наук;

В. Н. Ремесленников, д-р физ.-мат. наук;

А. И. Задорин, д-р физ.-мат. наук

Проблемы машиноведения : материалы III Междунар. науч.-техн.
П78 конф. (23–24 апр. 2019 г., Омск, Россия) : в 2 ч. / Минобрнауки России
[и др.] ; [науч. ред. П. Д. Балакин]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019.

ISBN 978-5-8149-2821-4

Ч. I : 320 с.

ISBN 978-5-8149-2822-1

Материалы конференции посвящены обобщению достижений в области машиноведения.

Издание предназначено для специалистов в области машиноведения, аспирантов и студентов.

УДК 621.01

ББК 34.4

*Мероприятие проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований,
проект № 19-08-20107*

ISBN 978-5-8149-2822-1 (ч. I)

ISBN 978-5-8149-2821-4

© ОмГТУ, 2019

11. Balwant singh Bisht Rajesh M Holmukhe Electricity load forecasting by artificial neuralnetwork model using weather data // International journal of electrical engineering & technology (IJEET). 2013. Vol. 4, Is. 1. P. 91–99.
12. Zheng T, Girgis A. A., Makram E. B. A hybrid wavelet-Kalman filter method for load forecasting // Electr Pow Syst Res. 2000. Vol. 54(1). P. 11–17.
13. Hongze Li, Liuyang Cui, and Sen Guo. A Hybrid Short-Term Power Load Forecasting Model Based on the Singular Spectrum Analysis and Autoregressive Model // Advances in Electrical Engineering. 2014. Vol. Article ID 424781. P. 7. Doi.org/10.1155/2014/424781.
14. A Hybrid Forecasting Model Based on Bivariate Division and a Backpropagation Artificial Neural Network Optimized by Chaos Particle Swarm Optimization // Day-Ahead Electricity Price Conference and Exposition, PSCE '09. IEEE/PES, 15–18 March 2009. P. 1–8.
15. Кошеков К. Т., Кашевкин А. А., Латыпов С. И., Савостина Г. В., Кошеков А. К. An Intelligent System for Vibrodiagnostics of Oil and Gas Equipment // Russian Journal Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54, no. 4. P. 249–259.
16. Манов Н. А. [и др.]. Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электро-энергетическими системами // Ин-т социально-экономических и энергетических проблем Севера. Екатеринбург : Уральское отделение РАН (УрО РАН). М.: Энергоатомиздательство, 2002. 78 с.
17. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares // Quarterly of Applied Mathematics. 1944. No. 5. P. 164–168.
18. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1963. Vol. 11(2). P. 431–441.
19. Protić, D. Feedforward neural networks: the Levenberg-Marquardt optimization and optimal brain surgeon pruning // Military technical courier. 2015. Vol. LXIII, no. 3. P. 11–28.

УДК 621.317.08

МОДЕРНИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

MODERNIZATION OF ACOUSTIC METHOD FOR THE DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSING

К. Т. Кошеков¹, П. В. Беляев², С. И. Латыпов¹, А. А. Савостин¹,
Н. И. Калантаевская¹, В. Ю. Кобенко², Б. В. Кошекова¹

¹Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Казахстан

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

K. T. Koshekov¹, P. V. Belyaev², S. I. Latypov¹, A. A. Savostin¹,
N. I. Kalantayevskaya¹, V. Yu. Kobenko², B. V. Kosheкова¹

¹M. Kozbayev North Kazakhstan State University, Petropavlovsk, Kazakhstan

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Описана технология модернизации акустической диагностики маслонаполненных трансформаторов путем подключения дополнительного интеллектуального блока анализа временных и статистических характеристик измерительного сигнала. Алгоритм функционирования блока основан на применении технологий искусственного интеллекта, идентификационных измерений и цифровой обработки диагностических сигналов, классификации параметров по назначенным классам сигнала и выводе о состоянии объекта с наименованием. Представлены результаты исследований образов измерительных сигналов диагностики трансформаторов, эксплуатируемых на базе АО «СЕВКАЗЭНЕРГО».

Ключевые слова: акустическая диагностика, обработка измерительных сигналов, идентификационные измерения, статистические параметры

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основными элементами электроэнергетических сетей и систем является маслонаполненные силовые трансформаторы. В процессе эксплуатации в них могут возникать развивающиеся дефекты, связанные с неполной или высокой влажностью пропитки изоляции, пробоем твердой изоляции, износом соедине-

тельных элементов и вводов, перегревом изолированных проводников и сердечника и т.д. Если дефекты не распознать в период зарождения и не провести своевременный ремонт, то дальнейшая эксплуатация может привести к выходу из строя не только дорогостоящего трансформатора, но и других элементов электроэнергетических сетей и систем: выключателей, шунтирующих элементов, кабельных линий, высоковольтных вводов.

По этой причине своевременная оценка технического состояния и диагностика силовых трансформаторов является обязательным и неотъемлемым требованием надежной и безопасной эксплуатации электроэнергетических сетей и систем.

В настоящее время дефекты в силовых трансформаторах сопровождаются локальными электрическими разрядами, а контроль и диагностика базируются на применении следующих методов неразрушающего контроля [1]: химический анализ, электрический контроль, хроматографический анализ, вибрационные измерения, термографические измерения, акустическая регистрация звуковых импульсов.

Первые пять методов достаточно изучены, однако акустический метод [2] в мире развивается и в настоящее время подготавливается новый международный стандарт (IEC 62 478) по измерению частичных разрядов.

Звуковые сигналы, являясь случайными, имеют сложную форму, при этом содержат стационарные и нестационарные составляющие. Так же наблюдается нестабильность по причине зависимости от внешних воздействий. Данный вид сигналов практически невозможно описать функциональными математическими зависимостями.

Для повышения точности диагностики силовых трансформаторов, вместе с анализом акустических сигналов, применяют и другие методы (хроматография, химический анализ масла и т.д.). В связи с увеличением числа операций получение конечного результата растянуто во времени.

В настоящее время существуют инновационные технологии углубленного анализа и цифровой обработки сложных сигналов, позволяющие создавать интеллектуальные методики, компьютерные приборы [3] и системы диагностики и мониторинга [4]. Примерами таких технологий являются машинное обучение, нейросетевые методы [5] и т.д. С их применением стало возможным решение прикладной задачи: установление логических зависимостей между характеристиками дефектов и некоторыми количественными параметрами сигналов.

Очевидно, если форма звукового сигнала определенного дефекта индивидуальна и к существующим методам и инструментам дополнительно применить инновационные технологии, то можно повысить эффективность диагностики и силовых трансформаторов.

Цель статьи – исследовать возможность применения технологий искусственного интеллекта, цифровой обработки сигналов на основе идентификационных измерений и статистической обработки для модернизации метода акустического контроля и диагностики силовых трансформаторов, разработать новую структуру модернизированного прибора акустических измерений.

II. МЕТОДИКА И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления логических связей между дефектами силового электрооборудования и звуковыми образами сигналов дефектов была разработана новая методика обработки сигналов, базирующаяся на применении технологий искусственного интеллекта, идентификационных измерений временных характеристик по назначенным классам, статистической обработки по временной и спектральной характеристикам.

Методика включает два режима: обучения и измерения, и алгоритмически реализуется следующими шагами.

М1: Режим обучения.

Шаг 1. Ввод эталонного сигнала $X^E(t)$ - звукового образа, характеризующего дефектное состояние.

Шаг 2. Идентификационное преобразование и цифровая обработка сигнала $X^E(t)$ с получением массива количественных параметров:

$$Id_N = [Id_1, \dots, Id_{12}] = [A_N, F_N, S_N, D_N, R_N, \sigma_N, MAD_N, A_{rmsN}, V_N, M_N, H_N, E_N], \quad (1)$$

где A_N, F_N, S_N, D_N, R_N – идентификационные параметры формы, частоты и регулярности (упорядоченности) сигнала, определяемые по выборке N временной характеристики эталонного сигнала $X^E(t)$ [6];

$\sigma_N, MAD_N, A_{rmsN}, V_N, M_N, H_N$ – статистические параметры выборки N временной характеристики эталонного сигнала $X^E(t)$: среднеквадратичное отклонение, среднее абсолютное отклонение, среднее квадратичное значение, дисперсия, мода, энтропия по Шенону;

E_N – статистический параметр энергии сигнала, определяемый по спектральной характеристике дискретного вейвлет-преобразования.

Шаг 3. Формирование базы эталонов в виде реляционной таблицы данных с количественными и качественными характеристиками:

$$S^E[a \times b] = \begin{bmatrix} \langle D_1^E \rangle: Class_{11}(Id_1^{E1}) & \dots & Class_{1b}(Id_b^{E1}) \\ \dots & Class_{ij}(Id_j^{Ei}) & \dots \\ \langle D_a^E \rangle: Class_{a1}(Id_1^{Ea}) & \dots & Class_{ab}(Id_b^{Ea}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\langle D_a^E \rangle$ – качественная характеристика объекта контроля и диагностики, например, название, описание дефекта, остаточный ресурс работы, рекомендации по устранению дефекта и т.д.;

Id_b^{Ea} – название количественного параметра звукового образа, определяемых в соответствии с (1);

a – количество назначенных классов (состояний объекта диагностики);

b – количество идентификационных параметров.

Для каждого класса определяются диапазоны принадлежности

$$Class_{ij}(Id_j^{Ei}) = \{\min Id_j^{Ei}, \max Id_j^{Ei}\}, \quad (3)$$

где $\min Id_j^{Ei}$ – минимальное значение диапазона для определенного состояния объекта диагностики;

$\max Id_j^{Ei}$ – максимальное значение диапазона.

M2: Режим измерения.

Шаг 1. Ввод исследуемого сигнала $X^I(t)$.

Шаг 2. Идентификационное преобразование и цифровая обработка $X^I(t)$ с получением массива количественных параметров в соответствии с (1).

Шаг 3. Формирование матрицы принадлежности в форме таблицы количественных параметров и качественных характеристик

$$P[b \times a] = \begin{bmatrix} E1 & E2 & \dots & Eb \\ Id_{x1} & d_{11} & \dots & d_{1b} \\ Id_{xa} & d_{a1} & d_{a2} & d_{ab} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Id_{xi} – название количественных параметров звукового образа исследуемого сигнала $X^I(t)$, определенных в соответствии с (1);

d_{ij} – параметр принадлежности, определяемый логической зависимостью:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } Id_i^X \in \text{Класс}_{ij}(Id_j^{Ei}) \\ 0, \text{ если } Id_i^X \notin \text{Класс}_{ij}(Id_j^{Ei}) \end{cases}. \quad (5)$$

Шаг 4. Логическое перемножение значений d_{ij} для каждого класса для определения выходного кода:

$$OutCode = \prod_{i=1}^a d_{ij}. \quad (6)$$

Шаг 5. Принятие решения о состоянии силового оборудования по выходному коду: ЕСЛИ $OutCode = 1$, ТО формируется отчет оператору, т.е. вывод качественной характеристики по принадлежности к назначенному классу, и переход на Шаг 1 M2: Режим измерения, ИНАЧЕ переход на Шаг 1 M1: Режим обучения.

При переходе в M1: Режим обучения при участии эксперта либо формируется новый класс принадлежности $Class_{ij}(Id_j^{Ei})$ с качественной характеристикой состояния электрооборудования, либо изменяют границы принадлежности $\min Id_j^{Ei}$ или $\max Id_j^{Ei}$. Также при обучении определяется перечень наиболее эффективных идентификационных и статистических количественных параметров (с исключением неинформативных).

Для исследования предложенной методики были разработаны компьютерные приборы по определению идентификационных параметров формы выборки N звукового сигнала в среде LabVIEW, статистических параметров и энергии в среде MATLAB.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторами статьи были проведены исследования по апробации разработанной методики на примере диагностики силовых трансформаторов, эксплуатируемых на подстанциях АО «СЕВКАЗЭНЕРГО» (г.Петропавловск, Казахстан). В качестве объектов исследования выступали трёхфазные масляные трансформаторы с естественной циркуляцией масла класса напряжения 35–110 кВ. Было обследовано 118 трансформаторов. Для получения экспертных оценок привлекались эксперты-специалисты лаборатории неразрушающего контроля и диагностики предприятия.



Рис. 1. Регистрация акустических сигналов подопытного трансформатора

В результате исследований был получен комплекс измерительных сигналов, характеризующих дефектные состояния трансформаторов. Их анализ позволил сделать ряд выводов.

Звуковой образ диагностического сигнала зависит от внешних воздействий. Следовательно, обработка сигналов по интервальным значениям идентификационных и статистических параметров по временным и частотным характеристикам является наиболее эффективным и достоверным.

Наиболее информативными из группы параметров являются 5:

- идентификационный параметр формы временной характеристики, определяемый по формуле:

$$A = 2 \cdot \frac{|\overline{\Delta X'(t)}|}{|\overline{X(t)}|} \cdot N, \quad (7)$$

где $\overline{X(t)}$ – среднее значение временной характеристики сигнала $X(t)$,

$\overline{\Delta X'(t)}$ – среднее значение приращения ранжированного сигнала,

N – количество выборок исследуемого сигнала;

- идентификационный параметр виртуальной частоты временной характеристики:

$$F = \frac{|\overline{\Delta X(t)}|}{|\overline{\Delta X'(t)}|}, \quad (8)$$

где $\overline{\Delta X(t)}$ – среднее значение приращения исследуемого временной характеристики;

- среднее квадратическое (квадратичное) значение:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i|^2}, \quad (9)$$

- энергия сигнала, вычисляемая по формуле:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^w |F_i|^2}{|w|}, \quad (10)$$

где F_i – компоненты спектра дискретного вейвлет-преобразования,
 w – размер окна (число компонент спектра).

- дисперсия – это мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания, вычисляемая по формуле:

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |X_i - \mu|^2. \quad (11)$$

Для маслонаполненных трансформаторов ТД, эксплуатируемых на подстанциях АО «СЕВКАЗЭНЕРГО», при $N = 15000$ в соответствии с разработанной методикой была сформирована база эталонных сигналов, которая в соответствии с (2) представлена в виде реляционной табл. 1 с количественными и качественными характеристиками.

ТАБЛИЦА 1
БАЗА ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ СОСТОЯНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ПАРАМЕТРАМИ ПО НАЗНАЧЕННЫМ КЛАССАМ

Имя класса	Диапазоны значений параметров									
	A		F		E		A_{rms}		V	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
$< D_1^E >$	103.67	164.31	49.37	93.09	0.0171	0.0175	0.02	0.091	0.0004	0.0082
$< D_2^E >$	27.66	177.15	54.11	279.21	0.0066	0.0071	0.015	0.075	0.0002	0.0058
$< D_3^E >$	122.72	184.12	74.16	132.12	0.0017	0.0215	0.042	0.0981	0.0017	0.0128
$< D_4^E >$	52.82	215.67	34.64	175.89	0.0097	0.0122	0.0222	0.071	0.0005	0.005
$< D_5^E >$	89.89	182.11	50.34	102.26	0.0009	0.001	0.0163	0.0197	0.0003	0.0004
$X(t)$	84.6301		107.972		0.012005		0.036991		0.001368	

В табл. 1 имена назначенных классов – это названия дефектных состояний, определенных экспертом:

$< D_1^E >$ – высокая влажность масла, увлажнение обмотки, дефект твердой изоляции;

$< D_2^E >$ – дефекты выводов;

$< D_3^E >$ – неудовлетворительная пропитка твердой изоляции маслом на заводе изготовителе;

$< D_4^E >$ – увлажнение трансформаторного масла, искрение между неизолированными токоведущими частями;

$< D_5^E >$ – бездефектное состояние оборудования с частичными разрядами начального уровня.

Классы с диапазонами принадлежности определяются автоматически по рекомендациям эксперта.

В табл. 1 также представлен пример оценки состояния трансформатора с исследуемым сигналом $X(t)$, численные значения идентификационных и статистических параметров которого включены в нижний столбец.

В соответствии с (4) формируется матрица принадлежности параметров для исследуемого сигнала $X(t)$ в форме табл. 2.

После логического перемножения в соответствии с (6) для каждого класса определяются выходные коды. В результате, как следует из табл. 2, исследуемый сигнал $X(t)$ несет в себе информацию о наличии искрения между неизолированными токоведущими частями и увлажнения трансформаторного масла.

В результате аналогичных исследований широкого комплекса сигналов установлено, что в среднем с 90-процентной вероятностью распознаются все дефектные состояния маслонаполненных трансформаторов.

Возможна модернизация акустического метода диагностики электрооборудования путем дополнительного подключения к ультразвуковому модератору «Дельфин» прибора с интеллектуальной цифровой обработкой звуковых сигналов. Структурная схема модернизированного прибора представлена на рис. 2.

ТАБЛИЦА 2
МАТРИЦА ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИССЛЕДУЕМОГО СИГНАЛА $X(t)$
НАЗНАЧЕННЫМ КЛАССАМ

Обозначение Id	Имя класса				
	$\langle D_1^E \rangle$	$\langle D_2^E \rangle$	$\langle D_3^E \rangle$	$\langle D_4^E \rangle$	$\langle D_5^E \rangle$
A	0	1	0	1	0
F	0	1	1	1	0
E	0	0	1	1	0
A_{rms}	1	1	0	1	0
V	1	1	0	1	0
$OutCode$	0	0	0	1	0

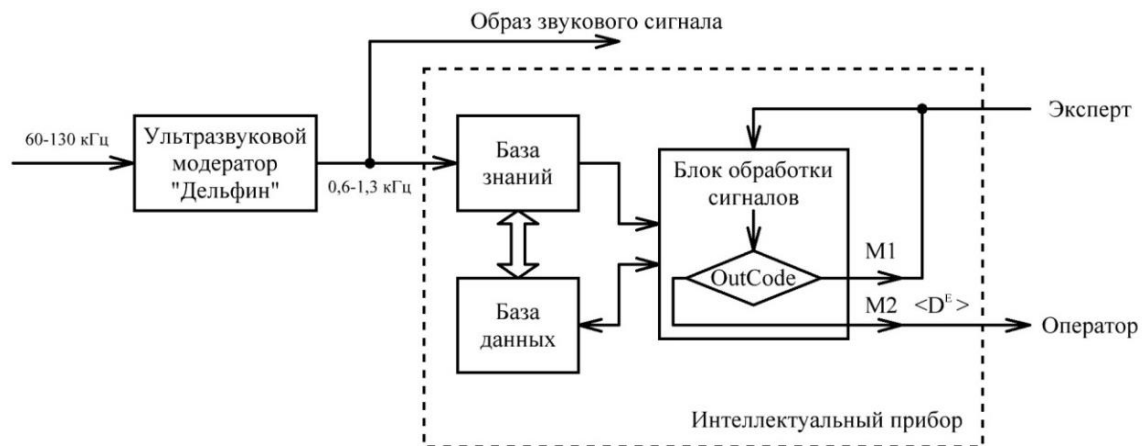


Рис. 2. Структурная схема модернизированного диагностического прибора

Модернизированный прибор, структурная схема которого показана на рис. 2, работает следующим образом. Звуковой образ исследуемого сигнала с выхода ультразвукового модератора «Дельфин» поступает в Базу знаний интеллектуального прибора, который функционирует в полном соответствии с разработанной методикой. В Базе знаний определяются 5 идентификационных и статистических параметров, систематизируются в массив, поэлементно сравнивается с классами эталонных значений, хранящихся в Базе данных, и формируют выходные коды ($OutCode$) по каждому классу. Блок обработки сигналов представляет собой программу, симулирующую ход рассуждений эксперта. В Блоке обработки сигналов по $OutCode$ либо формируется отчет оператору с качественными характеристиками по принадлежности к назначенному классу с последующим переходом к новым измерениям, либо происходит переход к режиму обучения. В данном случае при участии эксперта исследуется дефектное состояние, определяются его качественные (лингвистические) характеристики, далее либо формируется новый класс принадлежности $Class_{ij}(Id_j^{Ei})$, либо изменяют границы принадлежности $\min Id_j^{Ei}$ или $\max Id_j^{Ei}$. Также при обучении возможно введение дополнительных идентификационных или статистических параметров.

Данная модернизация при диагностике маслонаполненных трансформаторов позволяет не только локализовать место дефекта, но и распознавать дефектные состояния и виды неисправностей непосредственно у трансформатора, в полевых условиях, т.е. отказавшись от других методов анализа, принимать оперативные решения по устранению неисправностей на более ранних этапах и т.д.

Соответствие между результатами цифровой обработки сигналов и дефектными состояниями, при пополнении базы данных, определяется экспертами данной предметной области, на основании профессионального опыта и квалификации. Для определения дефектного состояния привлекаются стандартные методы диагностики. Данная процедура индивидуальна для каждого анализируемого объекта. В режиме измерения привлечение классических методов диагностики (хроматография, химический анализ масла и т.д.) не происходит. Следовательно, процесс диагностики значительно ускоряется. К тому же, из-за сокращения количества операций, уменьшается вероятность ошибок диагностики.

Компьютерный прибор полностью реализуем с применением современных микроконтроллеров (например, STM32), он легко подключается к ультразвуковому модератору «Дельфин» и встраивается в системы, обеспечивая также дистанционную диагностику и мониторинг с диспетчеризацией электроэнергетических объектов.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что применение технологий искусственного интеллекта, цифровой обработки сигналов на основе идентификационных измерений и статистической обработки позволяет более эффективно проводить акустический контроль и диагностику силовых трансформаторов.

Разработанная методика цифровой обработки сигналов по назначенным классам позволяет адекватно идентифицировать и распознавать сложные по форме и нестабильные временные и спектральные характеристики звуковых образов дефектных состояний силовых трансформаторов.

Предложенный модернизированный диагностический прибор с интеллектуальной обработкой звуковых образов дефектных состояний имеет ряд преимуществ, поскольку дополнительно может представлять экспертные оценки состояния электрооборудования.

Направление дальнейших исследований сконцентрировано на наращивании базы эталонов дефектных и бездефектных состояний силовых трансформаторов, возможном применении для диагностики другого типа электроэнергетического оборудования.

Исследования проводились в рамках научного гранта № 274 Министерства образования и науки Республики Казахстан и в порядке творческого сотрудничества Северо-Казахстанского государственного университета, Омского государственного технического университета и АО «СЕВКАЗЭНЕРГО» (г.Петропавловск, Казахстан).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чакраворти С., Дэй Д, Чатерджи Б. Современные методы мониторинга состояния трансформатора // Power Systems Springer-Verlag: Лондон, 2013.
2. Маркалус С., Тенболен С. Фезер К. Обнаружение и локализация частичных разрядов в силовых трансформаторах с использованием акустических и электромагнитных сигналов // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2008.
3. Кошеков К. Т., Савостин А. А., Кашевкин А. А., Астапенко Н. В., Кошекova Б. В. Модернизация виброанализаторов на основе идентификационных измерений // Дефектоскопия. 2018. № 5. 2018. С. 26–32.
4. Кошеков К. Т., Кашевкин А. А., Латыпов С. И., Савостина Г. В., Кошекova А. К. An Intelligent System for Vibrodiagnostics of Oil and Gas Equipment // Russian Journal Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54, no 4. P. 249–259.
5. Subhransu Sekhar Dash, Bhaskar M. Arun, Panigrahi Bijaya Ketan, Swagatam Das. Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems // Proceeding of ICAIECES. Springer. 2015. P. 1360.
6. Кликушин Ю. Н., Кошеков К. Т. Методы и средства идентификационных измерений сигналов. Петропавловск: Изд-во СКГУ им. М. Козыбаева, 2007. 186 с.

УДК 621.314.212:620.111.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

THRESHOLD VALUES DETERMINATION IN THE HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT DIAGNOSIS INSULATION BY THE ACOUSTIC METHODS

А. А. Кузнецов, М. А. Кузнецова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Andrey A. Kuznetsov, Maria A. Kuznetsova

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье приведены теоретические сведения диагностирования параметров изоляции высоковольтных трансформаторов акустическим методом. Показаны результаты экспериментальных исследований на высоковольтных трансформаторах в нормальном, предаварийном и аварийном состояниях. Для определения пороговых значений по результатам акустического контроля, проведено сравнение с данными хроматографического анализа. Приведены теоретические сведения о параметрах акустического сигнала, которые могут быть приняты в качестве порогового значения при диагностировании.

Ключевые слова: высоковольтные трансформаторы, энергетическое оборудование, диагностирование, акустический метод, частичные разряды.

СЕКЦИЯ 2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ, ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

П. В. Беляев, А. П. Головский

КОНТРОЛЬ И ОСМОТР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.....	234
---	-----

А. А. Бубенчиков, И. С. Лебедев, Т. В. Бубенчикова, Н. А. Терещенко

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ НУЖД В УСЛОВИЯХ РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА	238
---	-----

К. Т. Кошеков, П. В. Беляев, Н. И. Калантаевская, С. И. Латыпов, А. А. Савостин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ.....	246
--	-----

*К. Т. Кошеков, П. В. Беляев, С. И. Латыпов, А. А. Савостин, Н. И. Калантаевская,
В. Ю. Кобенко, Б. В. Кошек*

МОДЕРНИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.....	252
---	-----

А. А. Кузнецов, М. А. Кузнецова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	258
--	-----

Л. В. Мостовенко, В. П. Белоглазов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА В ИВЗ	264
---	-----

В. Ф. Мухин, Е. Н. Еремин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ШТУЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	270
---	-----

А. М. Парамонов, Е. М. Резанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОЙ СТЕПЕНИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ТЕРМОМАСЛЯНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	274
---	-----

И. А. Рындин, В. Н. Брендаков, С. Н. Кладиев

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗГОНА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОЧИСТКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ.....	279
--	-----

В. И. Трушляков, А. А. Новиков, И. Ю. Лесняк, Е. Chillemi

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ.....	286
---	-----

Научное издание

ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Материалы
III Международной научно-технической конференции
(23–24 апреля 2019 года, Омск, Россия)

В двух частях
Часть I

Печатается в авторской редакции

Компьютерная верстка *Л. Ю. Бутаковой*

Для дизайна обложки использованы материалы
из открытых интернет-источников

Подписано в печать 22.04.19. Формат 60×84¹/₈. Отпечатано на дубликаторе.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,00. Уч.-изд. л. 20,00.
Тираж 300 экз. Заказ 221.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Типография ОмГТУ.