

БАЙЕСОВСКИЙ КЛАССИФИКАТОР КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

А.А. Яхья, *В.М. Левин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, vlevin@corp.nstu.ru

Резюме: В статье рассмотрен метод формирования статистического Байесовского классификатора применительно к задачам эксплуатационной диагностики и оперативной оценки технического состояния трансформаторного оборудования. Предложено использование классификатора в качестве регулярного средства для повышения достоверности распознавания дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах по результатам анализа растворенных в масле газов. Разработан стохастический подход к формированию классификатора в условиях линейно реализуемой дихотомии классов технического состояния. В качестве разграничительного признака применена нелинейная функция от первичных контролируемых параметров состояния. Этим одновременно достигается как снижение размерности признакового пространства, так и улучшение характеристик случайного распределения. Предложенный подход позволяет сформировать решающее правило, минимизирующее суммарную ошибку принятия решений не зависимо от воздействия на объект случайных эксплуатационных факторов. Получены результаты исследования стохастических свойств распределений разграничительного признака для каждого из выделенных классов состояний. Разработан алгоритм, предназначенный для выполнения статистических вычислений и процедуры распознавания текущего состояния трансформатора с применением сформированного решающего правила. Представленные результаты исследования иллюстрируют возможность практического применения разработанного подхода в условиях реальной эксплуатации силовых трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, достоверность распознавания дефектов, Байесовский классификатор, решающее правило, статистические вычисления.

Для цитирования: Яхья А.А., Левин В.М. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. № 6. С. 11-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

BAYESIAN CLASSIFIER IS THE TOOL OF INCREASING THE EFFICIENCY OF DEFECTS RECOGNITION IN POWER TRANSFORMERS

AA Yahya, *VM Levin

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, vlevin@corp.nstu.ru

Abstract: The article considers the method of forming a statistical Bayesian classifier in relation to the problems of operational diagnostics and rapid evaluation of the technical condition of transformer equipment. It is proposed to use the classifier as a regular means to improve the reliability of defect recognition in power oil-filled transformers based on the analysis of dissolved gases in oil. A stochastic approach to the formation of the classifier in a conditions linearly realized dichotomy of technical status classes is developed. As a distinguishing feature, a nonlinear function of the primary parameters of state is used. This simultaneously achieves both a reduction in the dimension of the feature space and an improvement in the characteristics of the random distribution. The proposed approach allows to form a decisive rule that minimizes the

total error of decision-making regardless of the impact on the object of random operational factors. The results of the study of stochastic properties of the distributions of the distinguishing feature for each of the selected classes of states are obtained. The algorithm to perform statistical calculations and procedures for recognizing the current state of the transformer using the generated decision rule is designed. The results of the study illustrate the possibility of practical application of the developed approach in the real exploitation of power transformers.

Keywords: power transformer, accuracy of defect recognition, Bayesian classifier, decision rule, statistical calculations.

For citation: Yahya AA, Levin VM. Bayesian classifier is the tool of increasing the efficiency of defects recognition in power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019; 21(6):11-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

Введение

Повышение достоверности (уменьшение погрешности) оценки состояния оборудования представляет собой одну из ключевых задач технической диагностики не зависимо от сферы применения, применяемых методов и средств диагностирования. Актуальность задачи сопряжена с тяжестью последствий (затраты, ущерб), возникающих в результате ошибок при постановке диагноза, на основе которого принимаются несвоевременные и необоснованные решения о выводе оборудования в ремонт или отказе от ремонта. Решению указанной задачи посвящены многочисленные исследования, результаты которых в частности отражены в следующих публикациях [1-5].

Под достоверностью диагностирования принято понимать числовую характеристику соответствия результатов диагностики фактическому техническому состоянию объекта [1]. Различают инструментальную и методическую достоверность диагностирования. Инструментальная достоверность определяется составом и стабильностью диагностируемых параметров объекта, заданными допусками, а также точностью, чувствительностью и состоянием средств измерений [1, 2]. Методическая достоверность, как правило, связана с обработкой результатов измерений, выбором диагностических признаков и критериев для оценки технического состояния оборудования [3-5].

Одним из перспективных направлений повышения методической достоверности диагностирования маслонаполненных силовых трансформаторов с использованием результатов различных методов контроля является применение статистических решений, базирующихся на обработке данных многопараметрических измерений [6, 7, 9]. В статье рассмотрено развитие статистического подхода в направлении применения Байесовского классификатора, в качестве эффективного средства для повышения достоверности распознавания дефектов в маслонаполненных силовых трансформаторах по результатам анализа растворенных газов (АРГ).

Основные теоретические положения

Статистический подход в задачах технической диагностики электрооборудования (ЭО) базируется на наличии представительной выборки опытных данных из некоторой генеральной совокупности, которые соответствуют определенному закону распределения со статистическими моментами этого распределения. Данное положение позволило применить известные методы статистического анализа к решению многих принципиально важных задач диагностики, например, таких как формирование достоверного образа дефектов, определение допустимых и предельно-допустимых значений контролируемых параметров [8, 10], выявление и формализация практически значимых статистических зависимостей [11, 12].

Как правило, в эксплуатации ЭО, формированию выборок опытных данных предшествует определение совокупности информативных контролируемых параметров (признаков дефектов), которым предстоит выступить в роли случайных величин (СВ). Размерность исходного вектора признаков $X = x_1, x_2, \dots, x_N$ является тем параметром, от которого в критической степени зависит достоверность получаемых диагностических оценок. Дело в том, что каждая СВ x_i – компонента вектора X зачастую имеет собственное статистическое распределение со своими числовыми характеристиками, что существенно затрудняет интегральную оценку вектора признаков для формирования и разделения классов состояний ЭО. Сокращение размерности N пространства признаков упрощает преобразования и облегчает решение задачи статистической классификации. Для редукции

пространства признаков применимы методы, основанные на исключении зависимых и малозначимых компонент x_i (метод факторного анализа, метод главных компонент), которые вместе с тем не позволяют полностью исключить потери полезной диагностической информации [13].

Один из методов, использующих редукцию исходного пространства контролируемых признаков с применением специального преобразования в виде нелинейной функции от первичных диагностических параметров (1) предложен в [14]. Метод, применительно к анализу растворенных в масле силовых трансформаторов (СТ) газов (АРГ), вводит в рассмотрение обобщенный признак Φ , с помощью которого многомерное пространство X (концентраций диагностических газов A_i , ppm; $i = \overline{1,7}$ трансформируется на числовую ось в интервале $0 \div \infty$.

$$\Phi = \sum_{i=1}^7 \left[\left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right)^2 / \sum_{i=1}^7 \left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь A_{igr} , ppm – заданные предельные нормы концентраций диагностических газов.

Адекватная замена случайного вектора концентраций газов A_i скалярной дискретной СВ Φ позволяет от многомерной задачи перейти к исследованию свойств одномерного случайного распределения. При этом на положительной полуоси $\Phi \in 0 \div \infty$ выделяется дихотомия классов состояний трансформатора:

$$\begin{aligned} \text{класс } \Pi_1 &\in \text{состояние «норма»;} \\ \text{класс } \Pi_2 &\in \text{состояние «отклонение от нормы»} \end{aligned} \quad (2)$$

Решающее правило, устанавливающее взаимно однозначное соответствие между наличием в СТ развивающегося дефекта, значением обобщенного диагностического признака Φ и множеством классов технического состояния оборудования, может быть сформировано только после определения границы раздела дихотомии классов (2).

В условиях эксплуатации группы однотипных СТ случайная реализация Φ получается на основе единичного протокола АРГ. С учетом состава группы СТ и продолжительности периода их эксплуатации (в среднем 5 лет) может быть сформирована представительная выборка СВ, которая подвергается статистическому анализу с целью проверки закона распределения и вычисления статистических моментов в каждом из классов состояния. Для выполнения стартового разграничения дихотомии классов состояний применяется критерий «граничных концентраций»¹, согласно которому:

$$A_i \leq A_{igr} \in \Pi_1; \quad A_i > A_{igr} \in \Pi_2. \quad (3)$$

Благодаря возможности стартовой классификации по критерию (3), могут быть сформированы две обучающие выборки СВ Φ для выделенной дихотомии.

Статистический анализ распределений Φ для каждого из классов состояний производится с определением их числовых и интегральных характеристик, а также с проверкой гипотезы о принадлежности некоторому закону распределения. Многочисленные исследования статистики АРГ на разных контрольных группах СТ 110-220 кВ позволили выявить и обосновать ряд характерных особенностей распределений СВ Φ :

1) в большинстве практических случаев статистические распределения СВ Φ в классах состояний Π_1 и Π_2 представляют собой смеси нескольких однородных распределений, при возможности разделения которых появляется дополнительная диагностическая информация, ценная для обоснования правил принятия решений по дальнейшей эксплуатации СТ;

2) ширина диапазона изменения СВ Φ в классе Π_1 обусловлена:

- отличием сроков службы СТ контрольной группы: старение конструктивных элементов постепенно увеличивает концентрации характерных газов и, как следствие, значение Φ ;
- периодическим выполнением корректирующих мероприятий у длительно эксплуатируемых СТ: корректирующее воздействие с дегазацией масла уменьшает концентрации газов, а вместе с ними и значения Φ , делая их сопоставимыми со значениями, характерными для новых СТ;

¹ РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. 25 с.

3) ширина диапазона изменения СВ Φ в классе Π_2 прежде всего обусловлена различной степенью критичности (стадией развития) выявленных в СТ дефектов;

4) как правило распределения СВ Φ в каждом из классов являются двухпараметрическими и подчиняются одному из законов: нормальному, логарифмически-нормальному, гамма, что открывает возможности для применения существенных преимуществ Байесовского классификатора при формировании границы раздела дихотомии классов состояний СТ [15]. Одним из неопределимых для повышения достоверности диагностических оценок достоинств статистического Байесовского классификатора, основанного на отношении правдоподобия, является возможность минимизации суммарной ошибки распознавания дефектов в ЭО [16]. При этом наряду с оценкой принадлежности текущего состояния ЭО одному из выделенных классов состояний может быть определена и вероятность этой оценки.

Байесовский классификатор, сформированный для заданной дихотомии классов Π_1 и Π_2 , удовлетворяющий всем указанным требованиям, представлен выражением (4):

$$\ln[p(\Phi/\Pi_2)] - \ln[p(\Phi/\Pi_1)] = \ln[P(\Pi_1)/P(\Pi_2)]. \quad (4)$$

Здесь: $p(\Phi/\Pi_j)$ – условные плотности вероятности признака Φ , $j=1,2$; $P(\Pi_j)$ – априорные вероятности принадлежности состояния СТ к j -му классу; $P(\Pi_1)/P(\Pi_2)$ – отношение правдоподобия. Для случайной величины Φ , распределенной по нормальному или близкому к нему закону, выражение (4) преобразуется в квадратичную форму со строгим аналитическим решением (5):

$$\Phi_{гр} = M_1\sigma_2^2 - M_2\sigma_1^2 + \sqrt{D} / \sigma_2^2 - \sigma_1^2, \quad (5)$$

где: $\Phi_{гр}$ – математическая модель границы раздела дихотомии классов состояний; \sqrt{D} – функция числовых характеристик случайного признака Φ в каждом j -м классе состояний (M_j – математические ожидания; σ_j – среднеквадратические отклонения). В подавляющем большинстве случаев точной модели (5) может быть противопоставлена приближенная модель (6):

$$\Phi_{гр} \simeq M_1 + k \cdot \sigma_1, \quad (6)$$

удовлетворяющая «правилу 3-х сигм» для нормального статистического распределения Φ в классе состояний Π_1 . Исследованиями установлено достаточно хорошее совпадение результатов расчета $\Phi_{гр}$ по точной (5) и приближенной (6) моделям. Кроме того модель (6) позволяет корректировать значение $\Phi_{гр}$ путем подбора вычислительной константы $k = 2 \div 3$ по критерию $\min \varepsilon k$, где εk – оценка суммарной ошибки распознавания дефекта в СТ, включающая оценки ошибок 1 и 2 рода: ε_1 – «ложная тревога» и ε_2 – «пропуск дефекта». С учетом сказанного можно сформулировать следующие правила принятия решений по распознаванию классов эксплуатационного состояния СТ:

$$\Phi \leq \Phi_{гр}, \text{ класс состояния } \Pi_1; \quad \Phi > \Phi_{гр}, \text{ класс состояния } \Pi_2; \quad (7)$$

Результаты расчетов. Анализ и обсуждение

В расчетной части исследований рассмотрена ситуация с одним из блочных СТ НТЭЦ (ТДЦ-250000/220) 1992 года выпуска, у которого в августе 2006 года по данным диагностики был выявлен развивающийся термический дефект в диапазоне высоких температур $\theta > 700^\circ\text{C}$. Дальнейшая эксплуатация СТ сопровождалась повышенными концентрациями углеводородных газов: C_2H_4 – этилена, CH_4 – метана, C_2H_6 – этана, а также оксида С и диоксида C_2 углерода. Очаг дефекта предположительно располагался в нижней части ярма магнитопровода, куда доступ был исключен без полной разборки конструкции активной части (то есть выполнения дорогостоящего капремонта). Эксплуатацией было принято решение продолжить работу СТ под нагрузкой с учащенным отбором проб масла для АРГ и периодической его дегазацией. В таком состоянии СТ эксплуатировался до марта 2013 года. За это время развитие дефекта перешло в критическую фазу с угрозой термического повреждения целлюлозной изоляции. В результате ретроспектива АРГ составляла 146 протоколов, из которых 57 (согласно критерию «граничных концентраций») принадлежали классу состояний Π_1 , а 89 – классу Π_2 . На рис. 1 приведены гистограммы относительных частот Φ для выделенной

дихотомии классов состояний. Область пересечения гистограмм в классах Π_1 и Π_2 определяет суммарную ошибку распознавания состояния СТ, оценка которой составляет $\varepsilon = 2,57\%$. Числовые характеристики распределений Φ для дихотомии классов показаны в таблице. Вычисления $\Phi_{\text{гр}}$ по моделям (5) и (6) показали достаточно близкие результаты – 0,7351 и 0,7347 соответственно.

При значении вычислительной константы в выражении (6) $k = 2$ определяются следующие оценки ошибок $\varepsilon_1 = 1,75\%$ и $\varepsilon_2 = 0,82\%$, что вполне согласуется с требованиями реальной эксплуатационной практики.

Статистический анализ двухпараметрических распределений СВ Φ в каждом из классов состояний СТ с проверкой начальной гипотезы о принадлежности одному из выше перечисленных законов выполнялся по критерию Колмогорова-Смирнова. Расчеты с приемлемой доверительной вероятностью подтвердили состоятельность выдвигаемой начальной гипотезы. Иллюстративная часть расчетов в виде эмпирических и теоретических частот распределений Φ представлена на рис. 2.

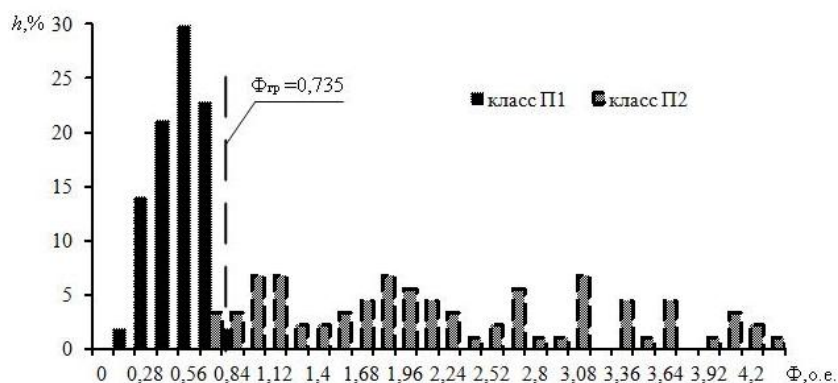
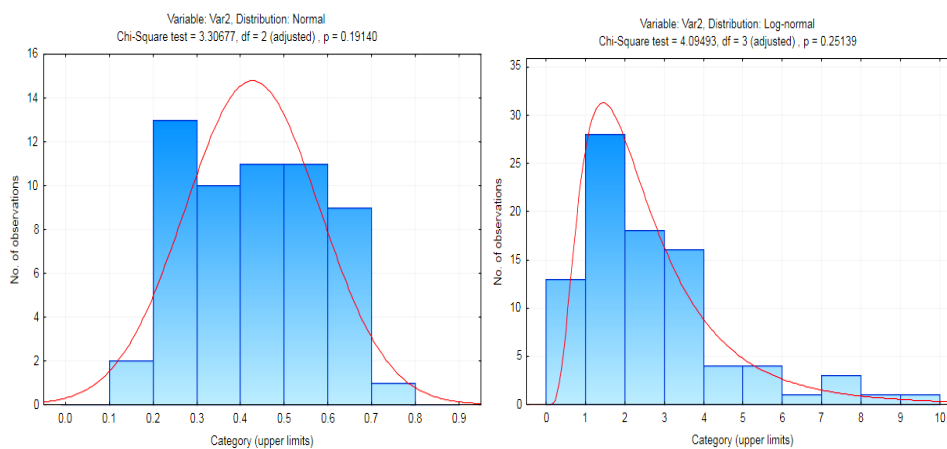


Рис. 1. Гистограммы относительных частот СВ Φ для дихотомии классов СТ

Таблица

| Числовые характеристики распределений СВ Φ для каждого из классов состояний | | |
|--|--|---------------------|
| Класс состояния СТ | Значения числовых характеристик распределения Φ | |
| Π_1 «норма» | $M_1 = 0,4273$ | $\sigma_1 = 0,1537$ |
| Π_2 «отклонение от нормы» | $M_2 = 2,0622$ | $\sigma_2 = 1,0689$ |

Результатами исследования установлено, что с доверительной вероятностью 0,95 исследуемое распределение случайного признака Φ в классе Π_1 удовлетворяет нормальному закону, в классе Π_2 – логарифмически-нормальному закону.



а – нормальное распределение в классе Π_1

б – логнормальное распределение в классе Π_2

Рис. 2. Результаты проверки гипотез о статистическом законе распределения СВ Φ

Для автоматизации статистических вычислений и последующей диагностической оценки состояния СТ по критериям (7) разработан алгоритм, представленный на рис. 3, и его программная реализация.



Рис. 3. Алгоритм статистических вычислений и оценки состояния ОД
(ВК – вибрационный контроль; ИК – инфракрасный контроль; ВВИ – высоковольтные испытания; АРГ – анализ растворенных газов)

Выводы

Актуальность повышения достоверности диагностических оценок ЭО, на основании которых принимаются решения о продлении его эксплуатации или выводе в ремонт, чрезвычайно высока, поскольку определяет надежность функционирования ЭО и электроэнергетической системы в целом. Применение Байесовского классификатора в качестве регулярного средства повышения методической достоверности диагностических оценок, не смотря на некоторые ограничения, открывает практически неограниченные возможности для формирования адаптивных решающих правил, минимизирующих суммарную ошибку распознавания. Предложены модели и методика расчета классификатора.

Рассмотрен один из примеров практического применения разработанного статистического подхода, представлена его алгоритмическая реализация, обеспечивающая поддержку вычислительных процессов. Результаты исследования наглядно демонстрируют перспективы в направлении формирования информационно-аналитической системы для поддержки принятия решений по эксплуатации маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе адаптивных правил с применением Байесовского классификатора.

Литература

1. Железнов Ф.Д., Акулов В.А., Плотников Ю.И. и др. Методы и средства повышения достоверности ультрафиолетовой диагностики изоляции контактной сети. Доступно по: www.panatest.ru/static?al=ultrafiolotovaja-diagnostika-izoljacji-kontaktnoj-seti. Ссылка активна 28 августа 2019.
2. Чернопазов М.С., Миронов И.С., Постановов С.А., и др. Повышение достоверности оценки измеряемых параметров технического состояния. 2015. №3. С. 24-29.
3. Кузнецова М.И., Китаев С.В. Повышение достоверности диагностирования технического состояния газотурбинных установок // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2014. №3. С. 25-28.
4. Агарков С.А., Власов А.Б., Юдин Ю.И. Система тепловизионной диагностики электро и теплоэнергетического оборудования на судах и объектах береговой инфраструктуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. №3. С. 66-74.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
6. Catterson V. M. and Rudd, S. E. and McArthur, S. D. J. and Moss, G. (2009). On-line transformer condition monitoring through diagnostics and anomaly detection. In: IEEE International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems 2009 (ISAP 2009), 8-12 Nov 2009, Curitiba, Brazil.
7. Dončuk J., Mentlik V., Velek J. Condition assessment of power transformer using gas detection

methods. Доступно по: <http://pe.org.pl/articles/2013/1a/42.pdf>. Ссылка активна на 28 августа 2019.

8. Mirowski P., LeCun Ya. Statistical Machine Learning and Dissolved Gas Analysis: A Review // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. V. 27. Is. 4. pp. 1791-1799.

9. Wang L., Zhao X., Pei J., et. al. Transformer fault diagnosis using continuous sparse auto encoder Springer Plus. 2016.V.5. P.448.

10. Давиденко И.В., Комаров В.И. Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. №1. С. 37-41.

11. Коваленко Д.А., Завидей В.И., Печенкин В.И. Применение корреляционного анализа при активно-тепловой диагностике внутреннего состояния силовых трансформаторов // В мире научных публикаций. 2015. № 2 (62). С. 449-464.

12. Захаров А.В. Корреляционные характеристики диагностических параметров газов, растворенных в масле, при нормальном режиме работы трансформатора // НРЭ. 2002. № 1. С. 36-40.

13. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., и др. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

14. Левин В.М., Яхья А.А. Адаптивное управление техническим состоянием силовых трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 11. С. 81-89.

15. Puza B. Bayesian methods for statistical analysis // Australian National University, VIEW. 2015; 677 p.

16. Юдин С.В., Протасьев В.Б., Подкопаев Р.Ю и др. Методика статистического приемочного контроля на основе байесовского подхода (гипергеометрическое распределение) // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 161-165.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, НЭТИ.

Яхья Аммар Абдулазиз – аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Zhelezov FD, Akulov VA, Plotnikov YuI et al. *Metody i sredstva povysheniya dostovernosti ul'trafiol'tovoi diagnostiki izolyatsii kontaktnoi seti*. Available at: www.panatest.ru/static?al=ultrafiol'tovajadiagnostika-izoljacji-kontaktnoj-seti. Accessed to: 28 Aug 2019.

2. Chernopazov MS, Mironov IS, Postanogov SA, et al. Povyshenie dostovernosti otsenki izmeryaemykh parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya. 2015;3:24-29.

3. Kuznetsova MI, Kitaev SV. Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh ustanovok. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2014;3:25-28.

4. Agarkov SA, Vlasov AB, Yudin YuI. Sistema teplovizionnoi diagnostiki elektro- i teploenergeticheskogo oborudovaniya na sudakh i ob'ektakh beregovoi infrastruktury. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016;3:66-74.

5. Birger IA. *Tekhnicheskaya diagnostika*. М.: Mashinostroenie, 1978. P. 240.

6. Catterson VM and Rudd, SE and McArthur, et al. On-line transformer condition monitoring through diagnostics and anomaly detection. In: *IEEE International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems 2009 (ISAP 2009)*, 8-12 Nov 2009, Curitiba, Brazil.

7. Dončuk J, Mentlik V, Velek J. Condition assessment of power transformer using gas detection methods. Available at: <http://pe.org.pl/articles/2013/1a/42.pdf>. Accessed: 28 Aug 2019.

8. Mirowski P, LeCun Ya. Statistical Machine Learning and Dissolved Gas Analysis: A Review. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012;27(4):1791-1799.

9. Wang L, Zhao X, Pei J, et al. *Transformer fault diagnosis using continuous sparse auto encoder Springer Plus* (2016) 5: 448. Published online 2016. doi: 10.1186/s40064-016-2107-7.

10. Davidenko IV, Komarov VI. Primenenie metodov matematicheskoi statistiki dlya polucheniya kriteriev otsenki sostoyaniya silovykh transformatorov po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov. *Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2003;1:37-41.

11. Kovalenko DA, Zavidei VI, Pechenkin VI. Primenenie korrelyatsionnogo analiza pri aktivno-
teplovoi diagnostike vnutrennego sostoyaniya silovykh transformatorov. *V mire nauchnykh publikatsii*. 2015;
2 (62): 449-464. doi: 10.12731/wsd-2015-2-26.
12. Zakharov AV. *Korrelyatsionnye kharakteristiki diagnosticheskikh parametrov gazov,
rastvorenykh v masle, pri normal'nom rezhime raboty transformatora*. NRE. 2002;1:36-40.
13. Aivazyan SA, Bukhshtaber VM, Enyukov IS, et. al. *Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i
snizhenie razmernosti*. Moskva: Finansy i statistika, 1989. P. 607.
14. Levin VM, Yakh'ya AA. Adaptivnoe upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem silovykh
transformatorov. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2018;11:81-89.
15. Puza B. Bayesian methods for statistical analysis: Australian National University, VIEW. 2015;
677 p.
16. Yudin SV, Protas'ev VB, Podkopaev RYu, et. al. Metodika statisticheskogo priemochного
kontrolya na osnove baiesovskogo podkhoda (gipergeometricheskoe raspredelenie). *Sovremennye
naukoemkie tekhnologii*. 2018;10:161-165.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email:
vlevin@corp.nstu.ru.

Ammar A. Yahya – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила в редакцию

12 сентября 2019г.