

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07

УДК 621.311:658.58:004.89

Д.К. ЕлтышевПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Функционирование современных систем производства, передачи, распределения энергии рассматривается в контексте применения цифровых технологий, позволяющих обеспечить их высокую безопасность, гибкость, адаптивность и экономичность. Информация о состоянии входящих в состав таких систем установок и оборудования является основой для принятия решений относительно стратегии его эксплуатации на краткосрочную и долгосрочную перспективу. **Цель исследования:** формализация принципов управления процессом эксплуатации электротехнического оборудования на основе достоверных данных о его техническом состоянии. **Методы:** задача управления процессом эксплуатации оборудования предполагает формирование сценариев, определяемых его техническим состоянием, которое оценивается с применением методов интеллектуальной обработки и анализа данных и машинного обучения. Источником подобной информации являются программно-аппаратные средства, позволяющие проводить неразрушающий контроль оборудования, его узлов и агрегатов. **Результаты:** рассмотрены ключевые особенности методики выбора сценария эксплуатации оборудования в соответствии с его фактическим (прогноznым) состоянием. Методика может быть применена к различным видам и типам оборудования, входящего в состав электросетевого объекта, а также к различным решениям в области контроля технических параметров. Показаны место и принципы использования методов машинного обучения при реализации методики. В частности, исследованы особенности применения методов деревьев решений и случайного леса для достоверной оценки состояния оборудования. В качестве примера предложена упрощенная модель оценки теплового состояния высоковольтного электрооборудования по данным инфракрасного контроля. Приведены результаты применения алгоритмов деревьев решений и случайного леса для определения дефектных состояний оборудования при ошибке классификации не более 9 %. **Практическая значимость:** предложенный подход позволяет принимать обоснованные решения для принятия своевременных мер по техническому обслуживанию и ремонту оборудования и снизить факты возникновения нештатных ситуаций. Методика является универсальной и может быть применена для объектов любой структуры и конфигурации, а также позволяет повышать точность оценки состояния выбранного объекта при накоплении статистических данных и использовании механизмов настройки и адаптивного выбора различных алгоритмов при формировании диагностических моделей.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, неразрушающий контроль, техническое состояние, анализ данных, машинное обучение, деревья решений, случайный лес.

D.K. Eltyshev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN THE ELECTRICAL EQUIPMENT OPERATION PROCESS ORGANIZATION

The functioning of modern systems of energy production, transmission and distribution is considered in the context of the use of digital technologies to ensure their high security, flexibility, adaptability and economy. Information about the installations and equipment condition included in such systems is the basis for making decisions regarding the strategy for its operation in the short and long term. **The purpose** of the study is to formalize the principles of managing the electrical equipment operation based on reliable data on its technical condition. **Methods:** We considered the task of managing the equipment operation process as the formation of scenarios determined by its technical condition. The condition is evaluated using the intelligent data processing and analysis and machine learning methods. The source of such information is software and hardware tools that allow non-destructive testing of equipment, its components and assemblies. **Results:** the key features of the technique for selecting the equipment operation scenario in accordance with its actual (forecast) condition were considered. The technique can be applied to various types of equipment of the power grid facilities, as well as to various solutions in the field of monitoring technical parameters. The principles of using machine learning methods in the implementation of the methodology were shown. In particular, the features of applying the methods of decision trees and random forest for a reliable assessment of the equipment condition were investigated. As an example, a simplified model for assessing the thermal condition of high-voltage electrical equipment based on infrared monitoring data was proposed. The results of applying decision tree and random forest algorithms to determine the defects of equipment with a classification error of no more than 9% were presented. **Practical significance:** the proposed approach allows you to make informed decisions to take timely measures for the maintenance and repair of equipment and reduce the occurrence of emergency situations. The technique is universal and can be applied to objects of any structure and configuration, and also allows you to improve the accuracy of assessing the selected object condition by accumulating statistical data and using the mechanisms of tuning and adaptive selection of various algorithms when forming diagnostic models.

Keywords: electrical equipment, non-destructive testing, technical condition, data analysis, machine learning, decision trees, random forest.

Введение

Развитие энергетического сектора в условиях цифровой экономики предполагает внедрение инновационных решений, позволяющих рассматривать энергетическую систему как безопасную, экологичную, энергоэффективную и адаптивную [1, 2]. Такая «цифровая» или «интеллектуальная» энергетическая система формируется на единой информационной платформе, являющейся источником данных для построения стратегии ее надежного и экономичного функционирования, и, по сути, является синтезом энергетической и информационной систем [1, 3–6]. Очевидно, что реализация интегрированных информационно-измерительных, информационно-управляющих систем и систем

информационно-аналитической поддержки на основе современных информационных технологий (интернет вещей, ВМ-технологии, BigData, ГИС-технологии и др.) становится важной задачей как на уровне отдельных электросетевых объектов, так и в рамках всего энергетического комплекса [3–6].

Процесс эксплуатации электротехнического оборудования (ЭО) в контексте перехода к энергетическим системам нового поколения сопряжен с функционированием современных средств и комплексов неразрушающего контроля (мониторинг, диагностика) электроустановок, отдельного оборудования, его узлов и агрегатов, что позволяет реализовать стратегию его обслуживания по фактическому состоянию [7–10]. Важным моментом в работе таких комплексов является не только получение достоверной информации о значениях параметров оборудования, но и ее анализ, позволяющий извлекать определенные закономерности в изменении данных, прогнозировать развитие дефектов и выбирать наиболее экономичный и безопасный вариант дальнейшей эксплуатации исследуемого объекта. Формализация методики выбора таких вариантов на основе имеющихся данных о состоянии оборудования является весьма сложной и актуальной задачей, ориентированной на оперативность принятия своевременных управленческих решений [7, 8, 10, 11].

Методика организации процесса эксплуатации ЭО

Задача управления процессом эксплуатации ЭО в обобщенном виде может быть представлена следующей функцией:

$$C=f(\mathbf{X}, Y, D, S, R). \quad (1)$$

В этом выражении составляющая $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ представляет собой перечень контролируемых параметров ЭО с привязкой к определенным методам неразрушающего контроля (НК). Параметр $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – это множество классов нормативных или дефектных состояний, которые могут быть обнаружены при помощи выбранного метода НК.

В этом случае процесс принятия решений состоит в идентификации некоторого «события» из заданного набора $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, связанного с переходом оборудования в определенное состояние, и реализации управляющих воздействий в соответствии с набором рекомендаций $D = (d_1, d_2, \dots, d_m)$.

Переход между состояниями ЭО, либо между соответствующими «событиями» осуществляется в соответствии с установленными границами работоспособности оборудования на основе специализированных правил R , которые формируются с учетом особенностей работы ЭО. Для целей классификации состояния ЭО и формирования правил могут использоваться различные методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения, поскольку они позволяют учесть специфику функционирования электросетевых объектов (сложная, распределенная структура, структурно-функциональная разнородность входящего в состав оборудования, неоднозначность в установлении нормативных значений параметров и т.д.) [10–17]. Несмотря на наличие достаточного задела в данной области, многие задачи формирования адаптивной технологии контроля и управления процессом эксплуатации ЭО по-прежнему остаются нерешенными.

Таким образом, выражение (1) подразумевает формирование некоторого сценария эксплуатации ЭО, определяемого его фактическим состоянием. Особенности данной технологии оценки фактического состояния оборудования и выбора наиболее рационального варианта его эксплуатации показаны на рис. 1 [10, 18].

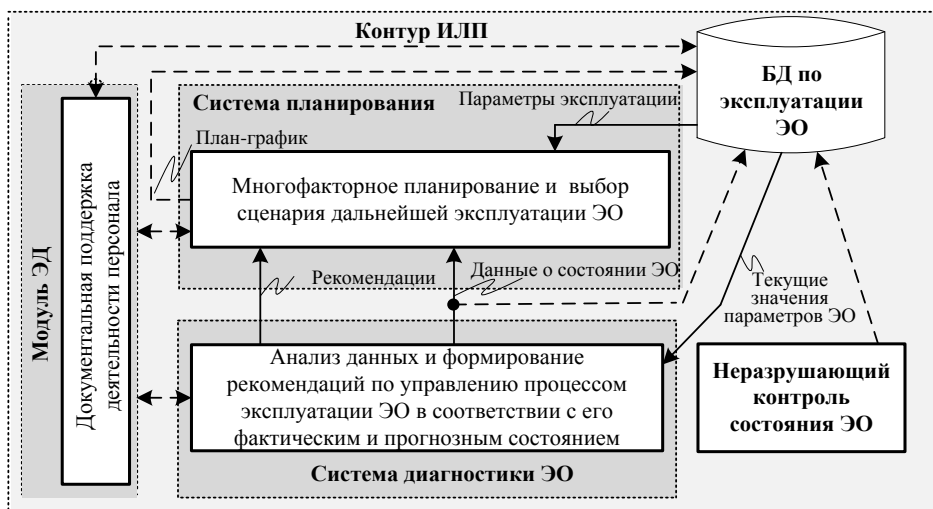


Рис. 1. Концептуальная схема управления процессом эксплуатации ЭО

Технология ориентирована на реализацию концепции интегрированной логистической поддержки (ИЛП) жизненного цикла электротехнических комплексов [8] и предполагает выстраивание эффективной

стратегии эксплуатации оборудования на основе процедур анализа (диагностика, прогнозирование), планирования и обеспечения инженерно-технического и оперативно-ремонтного персонала необходимой электронной документацией (ЭД).

Оценка количества классов состояния ЭО (возможных «событий») может осуществляться на основе анализа нормативно-технической или эксплуатационной документации, экспертной оценки, а также реальной статистики отказов и нарушений в работе ЭО. Пример классификации состояния приведен в [18].

Стоит заметить, что логика использования такого подхода к эксплуатации ЭО соответствует логике инженерно-технического персонала при последовательном принятии верного решения.

Обобщенный алгоритм формирования такого решения представлен на рис. 2.

Подход включает три основных этапа. На первом этапе (блок I) производится формализация ЭО выбранного электросетевого объекта с определением методов неразрушающего контроля, перечня ключевых технических параметров, категорий состояния оборудования в соответствии с типовыми дефектами («нагрев», «искра», «ползущий разряд» и др.), либо нормативными границами его работоспособности («в норме», «незначительный дефект», «критическое»). Оцениваются возможные варианты принятия решений в соответствии с состоянием ЭО, определяющие сценарии его эксплуатации. Примерами подобных управляющих воздействий могут быть: дальнейшая эксплуатация в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, ограничение эксплуатации с учащенным мониторингом состояния узлов и агрегатов и др. Детализированный список вариантов представлен в работе [18].

Далее (блок II) на основе имеющихся данных по эксплуатации ЭО осуществляется построение диагностической модели, позволяющей установить соответствие между значениями параметров ЭО и категориями его состояния. Для этих целей используются различные методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения, которые обеспечивают адаптацию к выбранному объекту и изменениям в показателях его эксплуатации.

Заключительный этап предполагает контроль параметров ЭО с заданной периодичностью и оценку фактического и прогнозного состояния ЭО с выработкой соответствующих рекомендаций и определением

сценария дальнейшей эксплуатации ЭО, в том числе с учетом процедуры планирования мероприятий по ТОиР [19] как элемента комплексной ИЛП-системы в рамках электросетевого объекта в целом (блок III).



Рис. 2. Блок-схема выбора сценария эксплуатации ЭО в соответствии с фактическим техническим состоянием

Использование методов машинного обучения при реализации методики

Рассмотрим возможности реализации предложенного подхода с использованием методов машинного обучения, в частности деревьев решений и случайного леса [20, 21].

В этом случае методика (рис. 2, блок 5) будет содержать дополнительную процедуру формирования связного графа с определенным количеством вершин V , выделенной вершиной, в которую не входит ни одно ребро (корень дерева), и условиями перехода T из одной вершины в другую. Подобные условия определяются, например, исходя из попадания контролируемых параметров ЭО в определенные диапазоны значений, и формируются в процессе анализа имеющихся статистических данных. Вершины, не имеющие исходящих ребер, называются терминальными (листами) и определяют классы состояния ЭО. Остальные вершины задают «путь» движения по структуре дерева.

Алгоритм построения дерева решений для оценки состояния ЭО и выбора сценария его эксплуатации предполагает выбор способа разбиения (и условия разбиения в конкретном узле дерева), критерий останова обучения, а также способа оценки точности полученного дерева.

Для оценки качества разбиения (ветвления) применяются различные критерии, оценивающие изменение неопределенности в системе, например, энтропия Шеннона, индекс Гини и др. [22]. В общем случае на каждой итерации входного обучающего множества строится такое разбиение по выбранному k -му признаку (с множеством значений $X^{(k)}$), чтобы средняя мера однородности для всех признаков была минимальной. Процедура повторяется рекурсивно для каждого подмножества до достижения критерия останова.

С целью повышения эффективности алгоритма обработки и обобщения имеющихся (обучающих) и новых (тестовых) данных целесообразно использовать несколько деревьев решений или так называемый алгоритм «случайного леса». Такой подход позволяет формировать деревья, случайным образом выбирая данные из имеющегося набора и случайным образом подбирая параметры при делении узлов (переходе от одной вершины к другой) [23]. Такой подход позволяет, кроме прочего, устранить ключевые недостатки классических деревьев решений – их сложной структуры и склонности к переобучению.

Пусть задано обучающее множество U , которое характеризует соответствие между наборами значений X параметров ЭО (для выбранного метода контроля, узла или подсистемы) и категориями его состояния Y .

Тогда подмножество данных $U^q, q=1:Q$ соответствует q -му дереву из деревьев решений Q , каждое из которых относит объект $x \in X$ к одному из классов состояния $c \in Y$.

Обозначим, что при $f_c^q(x)=1$ q -е дерево относит объект x к классу c .

В этом случае результат классификации определяется наиболее часто встречающимся классом в сформированном ансамбле деревьев (метод простого голосования) [23]:

$$a(x) = \arg \max_{c \in Y} G_c(x),$$

где $G_c(x)$ определяет число деревьев, относящих объект к каждому классу $c \in Y$:

$$G_c(x) = \frac{1}{Q_c} \sum_{q=1}^{Q_c} f_c^q(x), c \in Y.$$

Точность классификации можно определить по доле правильно определенных классов или по другим критериям [24].

Пример определения сценария эксплуатации ЭО с использованием деревьев решений и случайного леса

Предложенный подход применим к любому виду и типу ЭО, входящему в структуру электросетевого объекта (силовые трансформаторы, выключатели, высоковольтные вводы и др.).

В рамках данной работы рассмотрим упрощенную процедуру (рис. 3) анализа результатов тепловизионного контроля [25] для оценки состояния и определения сценария дальнейшей эксплуатации высоковольтных выключателей (ВВ) [26]. В качестве исходных данных рассмотрим отчеты по результатам ИК-мониторинга объектов системы электроснабжения нефтедобывающих комплексов Пермского края.

На рис. 3 приняты следующие обозначения. Параметры $X=(x_1, x_2, x_3)$ определяют значения избыточной температуры внешних контактных соединений выключателя. Параметры $Y \in (y_1, y_2, y_3, y_4)$ характеризуют альтернативные категории состояния ЭО: «норма» (y_1), «норма с незначительными отклонениями» (y_2), «норма со значительными отклонениями» (y_3), «критическое» (y_4). Состояние отказа ВВ не рассматривалось в связи с упреждающим характером стратегии управления его работоспособностью. Модель, приведенная на рис. 3, является частью комплексной модели оценки состояния выключателя, позволяющей производить анализ таких его элементов, как высоковольтные вводы (изоляторы, встроенные трансформаторы тока), бак (дугогасительная камера, устройство подогрева), привод.

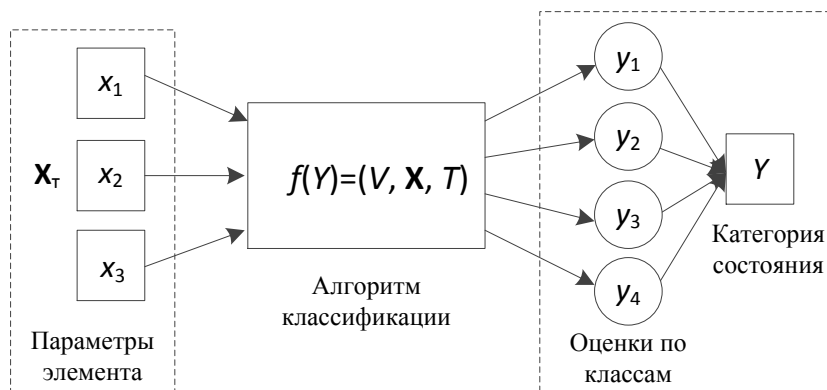


Рис. 3 Фрагмент структуры диагностической модели оценки теплового состояния выключателя (контактная система)

Для обучения и тестирования моделей деревьев решений и случайного леса использовался набор данных (табл. 1), содержащий 250 позиций (связка <значения параметров ВВ> – <класс состояния>) и разделенный в соотношении 70 и 30 %. Вычисления производились с использованием языка Python и библиотеки scikit-learn.

Таблица 1

Фрагмент набора данных по мониторингу состояния выключателей

№ п/п	Избыточная температура контакта фазы А (x_1), °С	Избыточная температура контакта фазы В (x_2), °С	Избыточная температура контакта фазы С (x_3), °С	Уровень дефекта (y)
1	4,10	1,20	0,00	1
22	22,00	1,50	0,50	3
28	2,70	6,90	0,00	2
89	0,00	3,90	0,20	1
103	45,00	3,00	1,00	4

Для обучения моделей использовался «жадный» алгоритм при различных сочетаниях настраиваемых параметров.

На рис. 4 показано распределение классов состояния выключателя на тестовых данных. В качестве приемлемого значения рассматривался результат классификации с точностью 90 % и выше. Анализ результатов указывает на более высокую точность моделей случайного леса (табл. 2). Учитывая возможность расширенной настройки параметров классификатора для улучшения результата, применительно к рассматриваемой задаче данный метод видится более эффективным.

В дальнейшем планируется исследовать модификации случайного леса и другие методы машинного обучения с учетом различных критериев оценки качества классификации, в том числе, применительно к более сложным задачам оценки состояния ЭО. Это поможет при формировании адаптивного механизма управления процессом эксплуатации ЭО.

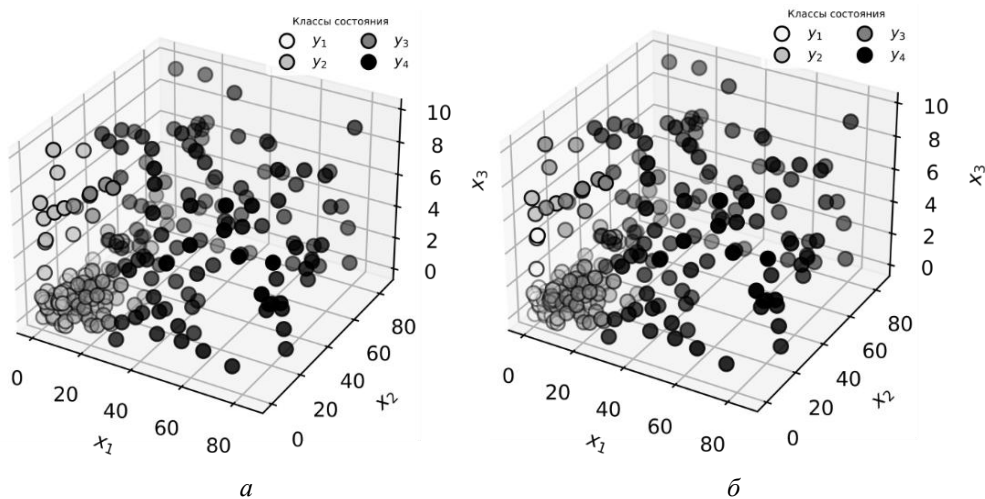


Рис. 4. Отклик алгоритмов дерева решений (а) и случайного леса (б) на исходные данные

Таблица 2

Результаты применения машинного обучения в задаче оценки состояния ВВ

Метод	Тип выборки	Показатель качества	
		Точность	Кросс-валидация
Деревья решений	Обучающая	0,89	0,85
	Тестовая	0,88	0,81
	Полная	0,89	0,88
Случайный лес	Обучающая	0,98	0,93
	Тестовая	0,92	0,81
	Полная	0,98	0,91

На рис. 5 представлены результаты оценки состояния нескольких выключателей 35 кВ, а также пример термограммы выключателя, для которого по методу случайного леса определен класс состояния u_4 , что соответствует критическому дефекту, связанному с превышением температуры контактов шпильке проходного изолятора одной из фаз.

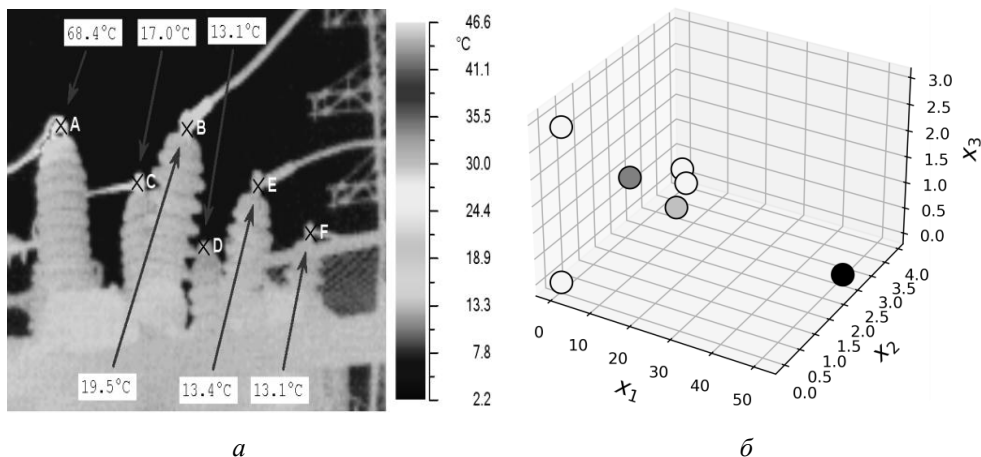


Рис. 5. Пример термограммы выключателя 35 кВ (а) и результаты оценки состояния по модели случайного леса (б)

Фактически реализация предложенных сценариев позволяет своевременно провести необходимый ремонт и техническое обслуживание (для рассматриваемого примера – внеплановое обслуживание с протяжкой болтовых контактов) и предотвратить возможную аварийную ситуацию.

Заключение

В статье рассмотрены принципы организации процесса эксплуатации ЭО по его фактическому техническому состоянию с использованием методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения. Предлагаемый подход к формализации задачи управления состоянием ЭО на основе построения эффективных сценариев эксплуатации является гибким с точки зрения вида и типа ЭО, используемых методов неразрушающего контроля и условий его функционирования. В дальнейшем он может быть применен при разработке механизма адаптивного управления процессом эксплуатации ЭО, позволяющего комбинировать различные технологии моделирования для получения достоверного результата оценки применительно к различным видам ЭО электросетевого объекта. Практическая реализация предлагаемого подхода может рассматриваться как один из механизмов построения комплексной интеллектуальной системы диагностики и эффективного управления состоянием оборудования как элемента единой информационной среды электрических сетей нового поколения.

Библиографический список

1. Мозохин А.Е., Мозохин А.Е. Анализ перспективного развития энергетических систем в условиях цифровой трансформации российской экономики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 82–93.

2 Елтышев Д.К. Выбор приоритетов при обслуживании, модернизации и обеспечении безопасности объектов энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2. – С. 5–10.

3. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 2–7.

4. Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments / V. Giordano, A. Meletiou, C.F. Covrig, A. Mengolini, V. Ardelean, G. Fulli, M. Jiménez, C. Filiou. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. – 142 p.

5. Smart grid technologies and applications / R. Bayindir, Ihami Colak, Gianluca Fulli, Kenan Demirtas // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 66. – P. 499–516.

6. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 4 (24). – С. 5–20.

7. Основы управления техническим состоянием электрооборудования / А.Н. Назарычев [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 204 с.

8. Елтышев Д.К., Костыгов А.М. Концепция эффективного управления состоянием электротехнического оборудования по данным неразрушающего контроля // Электротехника. – 2020. – № 11. – С. 45–50.

9. Li S., Li J. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: Review and prospective // High Volt. – 2017. – № 2. – P. 82–91.

10. Елтышев Д.К. Особенности комплексной оценки состояния электротехнического оборудования на основе неразрушающего контроля и интеллектуального анализа данных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 39. – С. 109–127.

11. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Management support of electroengineering equipment servicing based on the actual technical condition // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, № 6. – P. 1058–1069.

12. Predictive data mining techniques for fault diagnosis of electric equipment: A Review / Contreras-Valdes Arantxa, Juan P. Amezcuita-Sanchez, David Granados-Lieberman, Martin Valtierra-Rodriguez // Applied Sciences. – 2020. – № 10 (3). – P. 950.

13. Елтышев Д.К., Костыгов А.М. Интеллектуальный диагностический контроль и управление состоянием электротехнического оборудования // Электротехника. – 2019. – № 11. – С. 42–47.

14. Energetics systems and artificial intelligence: applications of industry 4.0 / T. Ahmad, H. Zhu, D. Zhang, R. Tariq, A. Bassam, F. Ullah, A.S. AlGhamdi, S.S. Alshamrani // Energy Reports. – 2022. – № 8. – P. 334–361.

15. Sarita K., Kumar S., Saket R.K. Fault detection of smart grid equipment using machine learning and data analytics // Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 693.

16. Pan S., Morris T., Adhikari U. Developing a hybrid intrusion detection system using data mining for power systems // IEEE Trans. Smart Grid. – 2015. – № 6 (6). – P. 3104–3113.

17. Jamil M., Sharma S.K., Singh R. Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network // SpringerPlus. – 2015. – № 4. – P. 334.

18. Eltyshv D.K. Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control // Journal of Physics: Conference Series. 2: International Conference on Innovation Energy 2020, IE 2020. – 2021. – P. 012010.

19. Елтышев Д.К. Многокритериальный анализ решений в интеллектуальных системах оценки и управления состоянием энергетического оборудования // Информатика и системы управления. – 2018. – № 2 (56). – С. 96–107.

20. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32.

21. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. – Second Edition (Springer). – 2016. – 764 p.

22. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор // Тр. Карельск. науч. центра РАН. – 2013. – № 1. – С. 117–136.

23. Кафтаников И.Л., Парасич А.В. Особенности применения деревьев решений в задачах классификации // Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 26–32.

24. Powers David M.W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation // Journal of Machine Learning Technologies. – 2011. – Vol. 2, № 1. – P. 37–63.

25. Jadin M.S., Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography // Infrared Physics & Technology. – 2012. – Vol. 55. – № 4. – P. 236–245.

26. Елтышев Д.К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5 (84). – С. 45–53.

References

1. Mozokhin A.E., Mozokhin A.E. Analiz perspektivnogo razvitiia energeticheskikh sistem v usloviakh tsifrovoy transformatsii rossiiskoi ekonomiki [Analysis of the prospective development of energy systems in the context of the digital transformation of the Russian economy]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 82-93.

2 Eltyshv D.K. Vybhor prioritetov pri obsluzhivanii, modernizatsii i obespechenii bezopasnosti ob"ektov energetiki [Priority ranking for maintenance, renovation, and ensuring security of power facilities]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2017, no. 2, pp. 5-10.

3. Sitnikov V.F., Skopintsev V.A. Intellektual'naia elektroenergeticheskaia sistema s aktivno-adaptivnoi set'iu [Intelligent electric power system with an active-adaptive grid]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 3, pp. 2-7.

4. Giordano V., Meletiou A., Covrig C.F., Mengolini A., Ardelean V., Fulli G., Jiménez M., Filiou C. Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, 142 p.

5. Bayindir R., Colak Ilhami, Fulli Gianluca, Demirtas Kenan. Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 66, pp. 499-516.

6. Massel' L.V. Sovremennyi etap razvitiia iskusstvennogo intellekta (II) i primenenie metodov i sistem II v energetike [The current stage of development of artificial intelligence (AI) and the application of AI methods and systems in the energy sector]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2021, no. 4 (24), pp. 5-20.

7. Nazarychev A.N. et al. Osnovy upravleniia tekhnicheskim sostoianiem elektrooborudovaniia [Basics of electrical equipment technical condition management]. Saint Peterburg: Politekhnikeskii universitet, 2015, 204 p.

8. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. Kontseptsiiia effektivnogo upravleniia sostoianiem elektrotekhnicheskogo oborudovaniia po dannym nerazrushaiushchego kontroliia [The concept of efficient control of the condition of electrical equipment according to nondestructive testing data]. *Elektrotekhnika*, 2020, no. 11, pp. 45-50.

9. Li S., Li J. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: Review and prospective. *High Volt*, 2017, no. 2, pp. 82-91.

10. Eltyshev D.K. Osobennosti kompleksnoi otsenki sostoianiia elektrotekhnicheskogo oborudovaniia na osnove nerazrushaiushchego kontroliia i intellektual'nogo analiza dannykh [Features of the electrical equipment complex condition assessment based on non-destructive control and intelligent data analysis]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 39, pp. 109-127.

11. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Management Support of Electroengineering Equipment Servicing Based on the Actual Technical Condition. *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 6, pp. 1058-1069.

12. Contreras-Valdes Arantxa, Juan P. Amezquita-Sanchez, David Granados-Lieberman, Martin Valtierra-Rodriguez. Predictive data mining techniques for fault diagnosis of electric equipment: A Review. *Applied Sciences*, 2020, no. 10 (3), 950 p.

13. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. Intellektual'nyi diagnosticheskii kontrol' i upravlenie sostoianiem elektrotekhnicheskogo oborudovaniia [Intelligent Diagnostic Control and Management Of The Condition Of Electrotechnical Equipment]. *Elektrotekhnika*, 2019, no. 11, pp. 42-47.

14. Ahmad T., Zhu H., Zhang D., Tariq R., Bassam A., Ullah F., AlGhamdi A.S., Alshamrani S.S. Energetics systems and artificial intelligence: applications of industry 4.0. *Energy Reports*, 2022, no. 8, pp. 334-361.

15. Sarita K., Kumar S., Saket R.K. Fault detection of smart grid equipment using machine learning and data analytics. *Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, vol. 693.

16. Pan S., Morris T., Adhikari U. Developing a hybrid intrusion detection system using data mining for power systems. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, no. 6 (6), pp. 3104-3113.

17. Jamil M., Sharma S.K., Singh R. Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network. *SpringerPlus*, 2015, no. 4, 334 p.

18. Eltyshv D.K. Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control. *Journal of Physics: Conference Series. 2: International Conference on Innovation Energy 2020, IE 2020*, 2021, 012010 p.

19. Eltyshv D.K. Mnogokriterial'nyi analiz reshenii v intellektual'nykh sistemakh otsenki i upravleniia sostoianiem energeticheskogo oborudovaniia [Multi-criteria decision analysis in intelligent systems for asses sing and managing of power equipment condition]. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2018, no. 2 (56), pp. 96-107.

20. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5-32.

21. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction, Second Edition (Springer), 2016, 764 p.

22. Chistiakov S.P. Sluchainye lesa: obzor [Random Forests Overview]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, no. 1, pp. 117-136.

23. Kaftannikov I.L., Parasich A.V. Osobennosti primeneniia derev'ev reshenii v zadachakh klassifikatsii [Features of the use of decision trees in classification problems]. *Vestnik IuUrGU. Komp'iuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 26-32.

24. Powers David M.W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011. vol. 2, no. 1, pp. 37-63.

25. Jadin M.S., Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 2012, vol. 55, no. 4, pp. 236-245.

26. Eltyshev D.K. *Intellektual'nye modeli kompleksnoi otsenki tekhnicheskogo sostoianiia vysokovol'tnykh vykliuchatelei* [Intelligent models for complex assessment of technical condition of high-voltage circuit breakers]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2016, no. 5 (84), pp. 45-53.

Сведения об авторе

Елтышев Денис Константинович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eltyshev@msa.pstu.ru).

About the author

Eltyshev Denis Konstantinovich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Microprocessor Automation Means Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: eltyshev@msa.pstu.ru).

Поступила: 20.08.2022. Одобрена: 30.08.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад автора. Вклад автора 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Елтышев, Д.К. Интеллектуальные технологии в организации процесса эксплуатации электротехнического оборудования / Д.К. Елтышев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 119–135. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07

Please cite this article in English as:

Eltyshev D.K. Intelligent technologies in the electrical equipment operation process organizations. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 119-135. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07