

## Раздел III. Электроника, приборостроение и радиотехника

УДК 005, 51-74

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-231-243

**С.С. Верещагина**

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ\***

*Диагностирование электрооборудования согласно нормативным документам, является сложным и многофакторным процессом, который регулярно проводится на промышленных предприятиях и характеризуется широким спектром неопределенностей, связанных с неточными, нечеткими и неполными исходными данными, большой трудоемкостью, рисковыми ситуациями. Это приводит к накоплению и развитию различных дефектов, к нарушению электроснабжения промышленных предприятий и технологических процессов, а также к выходу оборудования из строя. Для повышения производительности функционирования и высокого уровня отказоустойчивости оборудования необходимо разрабатывать методы, модели и средства диагностирования с использованием современных информационных технологий, включая методы и технологии искусственного интеллекта, учитывающих не только количественную, но и качественную исходную информацию. В настоящей работе предложен системный подход к оцениванию технического состояния электрооборудования на этапе его эксплуатации, направленный на реализацию общесистемных принципов, а также на рассмотрение данного процесса в виде открытой системы, тем самым позволяя наилучшим образом организовать процесс принятия решений в системе управления. Данные принципы позволят сформулировать различные задачи к оцениванию технического состояния оборудования с использованием информационных технологий и технологий искусственного интеллекта, а также определить способы и пути их решения. Предложена структура единого комплекса оценивания ЭО для интеллектуальных диагностических систем, устанавливающая последовательность решаемых задач и применяемых для них методов, подходов. Единый комплекс позволит повысить информативность ситуаций принятия решений и достоверность заключений о техническом состоянии оборудования в условиях неполной и нечеткой информации.*

*Комплекс методов и моделей; технологии искусственного интеллекта; электрооборудование; неполная и нечеткая информация.*

**S.S. Vereshchagina**

### **METHODOLOGICAL BASES OF ASSESSMENT IN DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT**

*Diagnostics of electrical equipment, according to regulations, is a complex and multifactorial process which is regularly carried out at industrial enterprises and is characterized by a wide range of uncertainties related to inaccurate, fuzzy and incomplete initial data, high labor intensity and risk situations. This results in accumulation and growth of various defects, disruption of power supply to industrial enterprises and technological processes, as well as equipment failure.*

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ № 23-29-00415.

*To improve the efficiency of operation and high level of equipment fault tolerance, it is necessary to develop methods, models and means of diagnostics using modern information technologies including methods and technologies of artificial intelligence, taking into account not only quantitative but also qualitative initial information. This paper proposes a systematic approach to the assessment of the technical condition of electrical equipment at the stage of its operation. The approach is aimed at the implementation of system-wide principles, as well as the consideration of this process as an open system, thus making it possible to best organize the decision-making process in the control system. These principles will provide an opportunity to formulate various tasks to assess the technical condition of equipment using information technologies and artificial intelligence technologies, as well as to determine the ways and means of their solution. The authors proposed the structure of a unified complex of EE assessment for intelligent diagnostic systems which sets the sequence of tasks to be solved and the methods and approaches to be used for them. The unified complex will increase the informativeness of decision-making situations and reliability of conclusions about the technical condition of equipment under conditions of incomplete and fuzzy information.*

*A set of methods and models; artificial intelligence technologies; electrical equipment; incomplete and fuzzy information.*

**Введение.** В настоящее время электрооборудование (ЭО) представлено огромным многообразием элементов, устройств, систем, комплексов и обладает своей значимостью, назначением и особенностями выполняемых им функций, а также характеризуется разнотипными взаимосвязанными элементами. Несмотря на высокие эксплуатационные характеристики, ЭО на этапе эксплуатации часто преждевременно выходят из строя по различным причинам [1–4], которые могут привести к аварийным ситуациям (повреждениям), к ухудшению технических характеристик ЭО, к выходу оборудования из строя, а также к большому экономическому ущербу в энергосистеме.

Для повышения производительности функционирования и поддержания необходимой степени надежности оборудования в процессе его эксплуатации необходимо проводить его диагностирование, которое позволит решить большой спектр различных задач, одной из которых является оценивание технического состояния оборудования. Однако такое оценивание существенно усложняется наличием следующих проблем: сложностью диагностируемого оборудования, большим количеством параметров оборудования, влияющих на его техническое состояние, большим объёмом диагностических разнородных данных, а также недостаточностью внедрения современных методов диагностирования ЭО [5–7].

Таким образом, проблема оценивания технического состояния ЭО на этапе его эксплуатации в условиях неполной и нечеткой информации, несмотря на достаточное количество работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных диагностированию ЭО, является актуальной.

Автором в настоящей работе предлагается рассмотреть методологические основы оценивания технического состояния ЭО на этапе его эксплуатации в условиях неполной и нечеткой информации, целью которых является повышение информативности ситуаций принятия решений и достоверности заключений о техническом состоянии оборудования.

**Ключевые понятия, исходные данные к оцениванию технического состояния электрооборудования.** Для поддержания работоспособности ЭО и предотвращения выхода его из строя предлагается применить системный подход для управления процессом оценивания технического состояния ЭО, дающий возможность рассматривать данный процесс как целостную систему, тем самым позволяя находить эффективные диагностические решения возникающих проблем и управлять возникшими изменениями.

На рис. 1 представлена обобщенная схема системы управления процессом оценивания технического состояния ЭО с учетом неполной, нечеткой и статистической информации, адаптированная автором.

На схеме:  $W$  – внешняя информация (нормативные требования, ГОСТы, паспортные данные на оборудование, где указаны условия эксплуатации, допустимые отклонения от номинальных значений основных параметров ЭО, основные показатели качества электрической энергии и т.п.) [8, 9];  $A$  – внутренняя информация (архивная информация о состоянии ЭО), используемая для решения задач управления;  $U$  – управляющее воздействие (принятие управленческих решений – прямая связь);  $Y_{Oy}$  – выходная информация (текущие значения параметров, факторов, характеризующие состояние ЭО);  $Y_m$  – модельные (расчетные) значения параметров, полученные посредством использования разработанных моделей, интеллектуальных методов и подходов;  $\varepsilon$  – ошибка (рассогласование);  $\varepsilon_{доп}$  – фиксированное заданное значение;  $L(Y_{Oy}, Y_m)$  – проверка соответствия данных, полученных на основе моделей и методов, реальному объекту ЭО;  $Y'$  – информация о состоянии ЭО (обратная связь);  $Y'_{км}$  – корректировка моделей (добавление новых параметров, факторов и связей между ними; корректировка взвешенных нечетких правил; корректировка весов важности параметров и др.);  $Y_a$  – адекватный результат, отвечающий всем нормативным требованиям, ГОСТам.

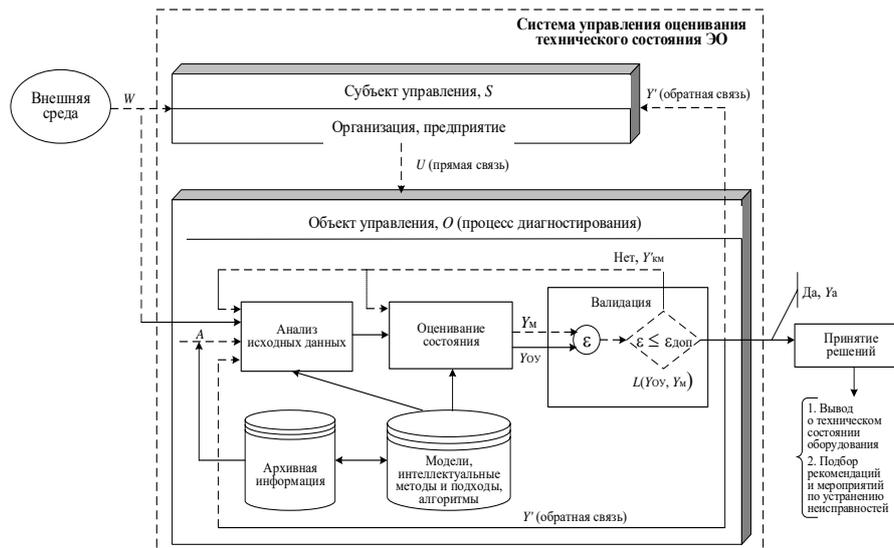


Рис. 1. Обобщенная схема системы управления процессом оценивания технического состояния ЭО

Если полученные результаты (модельные значения)  $Y_m$  не отвечают фактическим результатам, которые характеризуют состояние  $Y_{Oy}$  (условие  $\varepsilon \leq \varepsilon_{доп}$  не выполняется), то необходимо внести корректировки ( $Y'_{км}$ ). Если условие  $\varepsilon \leq \varepsilon_{доп}$  выполняется, то результат является адекватным  $Y_a$ . Для проверки адекватности результата предлагается использовать, например, точность, полноту и специфичность для искусственной нейронной сети, «исторический метод» [10, 11] и др.

Управление процессом оценивания технического состояния ЭО осуществляется с применением *обратной связи*  $Y'$ . Субъект управления  $S$  получает информацию  $Y'$  от объекта управления  $O$  и внешней среды  $W$ , обрабатывает и сопоставляет ее с желаемыми значениями параметров объекта управления, а затем принимает

новое решение. Далее вырабатывает следующее управляющее воздействие  $U$  на ее основе. Объект управления также воспринимает информацию  $Y'$ , обрабатывает и сопоставляет ее с желаемыми значениями параметров объекта управления и на ее основании исправляет ошибку.

Отметим, что исходные данные могут быть представлены в виде статистической информации, поступающих с приборов, в виде интервалов, для определения выхода значения параметра за допустимые пределы (по ГОСТ), в виде черно-белых графиков, на котором отображены изменения параметра во времени, в виде цветных изображений с тепловизора, на которых отображено тепловое состояние ЭО. Для обработки разнородных исходных данных, определения их влияния не только на состояние ЭО, но и на другие параметры и как следствие оценивание технического состояния ЭО необходимо применять единый комплекс диагностирования ЭО.

Далее рассматриваются методологические основы оценивания технического состояния ЭО, с одной стороны, как система получения научных знаний, представленных в виде неоднородных когнитивных моделей, методов, подходов, алгоритмов, общесистемных принципов, а, с другой стороны, как система действий, направленных на использование новых знаний о состоянии ЭО для подбора рекомендаций и мероприятий по устранению неисправностей.

**Структура единого комплекса диагностирования ЭО.** Для оценивания технического состояния ЭО необходимо разрабатывать и применять новые модели и методы с использованием современных информационных технологий, технологий искусственного интеллекта (средства нечеткой логики, искусственные нейронные сети), основанных на слиянии нескольких разнотипных параметров. Данные модели и методы, имея оптимальный набор параметров, основанный на полном анализе электрических, механических, тепловых, вибрационных и других параметров, позволяют не только оценивать техническое состояние ЭО, но и извлекать и использовать знания, накопленные специалистами, такими как ученые, инженеры, административно-технический, оперативно-ремонтный, оперативный, ремонтный, технологический персонал.

При разработке моделей и методов оценивания технического состояния ЭО с использованием методов и технологий искусственного интеллекта предъявляются следующие требования [12]:

- ◆ учитывать в разработанных моделях и методах многофакторность процесса оценивания технического состояния ЭО, при этом они должны обеспечивать требуемую достоверность и не противоречить полученным результатам;
- ◆ не предъявлять особых требований для режимов работы ЭО, которые трудно осуществить на практике при проведении измерений либо они должны быть разработаны с их учетом;
- ◆ обеспечивать сокращение времени на принятие решений при оценивании технического состояния ЭО для предупреждения не своевременного выхода ЭО из строя;
- ◆ обеспечивать информационную поддержку принятия решений при оценивании технического состояния ЭО своевременно и многократно за счет разработанных моделей, например, неоднородных когнитивных моделей;

Теоретические положения разработки моделей и методов для оценивания технического состояния ЭО, базируются на следующих принципах:

- ◆ *принцип системности* – при принятии решений относительно технического состояния ЭО необходимо классифицировать по значимости не только диагностические параметры, но и их значения;

♦ *принцип многообразия* – необходимо применять различные современные информационные технологии, методы и технологии искусственного интеллекта, а также их комбинации, для получения более полного и точного оценивания технического состояния ЭО (при этом получают новые знания, зависимости, которые отсутствовали ранее);

♦ *принцип декомпозиции* – процесс оценивания технического состояния ЭО необходимо разделить на множество этапов, и установления связей между ними для рассмотрения как по отдельности, так и в совокупности;

♦ *принцип итеративности* – проведение комплексного оценивания технического состояния ЭО является процессом, предполагающим определенную последовательность методов;

♦ *принцип адаптации* – процесс оценивания технического состояния ЭО быстро изменяется с изменением свойств внешней среды, и адаптация достигается за счет применения различных методов с использованием современных информационных технологий и технологий искусственного интеллекта.

Рассмотренные принципы позволяют сформулировать с единых теоретических позиций различные задачи, связанные с оцениванием технического состояния ЭО:

1) фильтрация данных от шумов, которые возникают в результате их получения, технологий передачи информации, методов оцифровывания данных;

2) классификация параметров по значимости с целью определения основных, дополнительных и вспомогательных параметров, которые делятся по степени их влияния на ЭО, что позволит выделить наиболее значимые параметры, которые существенно влияют на работоспособность ЭО;

3) поиск отклонений значений параметров от норм, установленных ГОСТами, методическими рекомендациями и другой нормативной информацией, что позволит определить параметры, вышедшие за границы допустимых интервалов, для последующего поиска причин их выхода, а также рассмотреть их в первую очередь как наиболее вероятную причину возможного выхода ЭО из строя;

4) классификация значений параметров с присвоением веса важности термножества с целью определения параметров, по которым значения вышли за предельные интервалы, и проведения их анализа в первую очередь.

5) оценивание технического состояния ЭО и прогнозирование значений параметров ЭО с использованием разработанных моделей, интеллектуальных методов и подходов, алгоритмов для получения более полной картины о текущем техническом состоянии ЭО и исключения ошибочных выводов;

6) подбор рекомендаций и мероприятий по устранению неисправностей для предотвращения преждевременного выхода ЭО из строя и обеспечение его бесперебойной работы на основе методических рекомендаций, ГОСТов, паспортных данных на оборудование и опыта специалистов.

На рис. 2 представлена структура единого комплекса оценивания технического состояния ЭО, разработанная автором.

Суть единого комплекса оценивания технического состояния ЭО заключается в последовательном использовании разработанных моделей и методов на всех этапах диагностирования с целью подбора рекомендаций и мероприятий по устранению неисправностей ЭО. Последовательное использование различных методов и моделей позволит учесть многофакторность, разнотипность исходных данных, которые невозможно проанализировать одним методом, при необходимости внести коррективы в модели, избежать взаимоисключающих ошибочных выводов, а также всесторонне оценить техническое состояние ЭО.

Далее показаны постановки некоторых разработанных методов, входящих в единый комплекс оценивание технического состояния ЭО.

1) Идея метода 1.3 «Метод оценивания степени взаимосвязи между параметрами с применением статистических методов» [13] заключается в комплексном подходе к выбору основных параметров для последующего оценивания технического состояния ЭО на основе сравнения рангового коэффициента корреляции Спирмена, коэффициентов ассоциативности, знаковой корреляционной функции вида «знак-знак» [14, 15]

$$\left( S_1 = \frac{P_{11}}{P_{10} + P_{11} + P_{01}}, S_2 = \frac{P_{11} + P_{00}}{P}, S_3 = \frac{P_{11}}{P}, S_4 = \frac{2P_{11}}{2P_{11} + P_{10} + P_{01}}, \right. \\ \left. S_5 = \frac{2(P_{11} + P_{01})}{P + P_{11} + P_{00}}, S_6 = \frac{P_{11}}{P_{11} + 2(P_{10} + P_{01})}, S_7 = \frac{P_{11} + P_{00}}{P_{11} + 2(P_{10} + P_{01})} \right),$$

где  $p = p_{00} + p_{01} + p_{10} + p_{11}$ ,  $p_{00}$  – частота того, что приращения значений параметров источник (причина) и приемник (следствие) одновременно принимают отрицательные значения;  $p_{01}$  – частота того, что приращение значений параметров источник принимает отрицательное значение, а приемник – положительное значение;  $p_{10}$  – частота того, что приращение значений параметров источник принимает положительное значение, а приемник – отрицательное значение;  $p_{11}$  – частота того, что приращения значений параметров источник и приемник одновременно принимают положительные значения), в определении максимального значения коэффициентов и усреднении полученных значений для каждой пары связанных параметров.

2) Идея метода 1.5 «Метод отбора параметров с применением аппарата нечеткой логики» [16] заключается в ранжировании и отборе значимых параметров с учетом множества разнотипных параметров на основе связи между параметрами, которые могут быть представлены в виде вербального описания (например, «влияет») либо иметь вес  $w_{ij}$ , характеризующий силу связи между параметрами, а также в формировании нечеткого множества  $C_k$ :

$$\tilde{C}_k = \{ \mu_{C_k}(x_1^*)/x_1^*, \mu_{C_k}(x_2^*)/x_2^*, \dots, \mu_{C_k}(x_h^*)/x_h^* \}, i = \overline{1, h}, k = \overline{1, m}, \mu_{C_k}(x_i^*)/x_i^*$$

– степень принадлежности  $i$ -го элемента  $X_i^*$  множеству  $\tilde{C}_k$ ,  $\sum_{i=1}^h \mu_{C_k}(x_i^*) = 1$  для

отсеивания незначимых параметров.

3) Идея метода 2.2 «Метод распознавания неисправностей ЭО с применением сверточных нейронных сетей» заключается в извлечении признаков изменения параметров в соответствии с поведением работоспособности ЭО, которое заключается в распознавании черно-белых графиков, на которых отображены изменения параметров во времени, цветных изображений, полученных от тепловизора. Это необходимо для определения предельных или аномальных температур, которые проводятся бесконтактно в режиме реального времени во время работы ЭО и по распознаным данным осуществляется классификация технического состояния [17]. Использование сверточной нейронной сети для распознавания технического состояния ЭО позволит сократить количество параметров, необходимых в анализе, и повысить точность классификации.

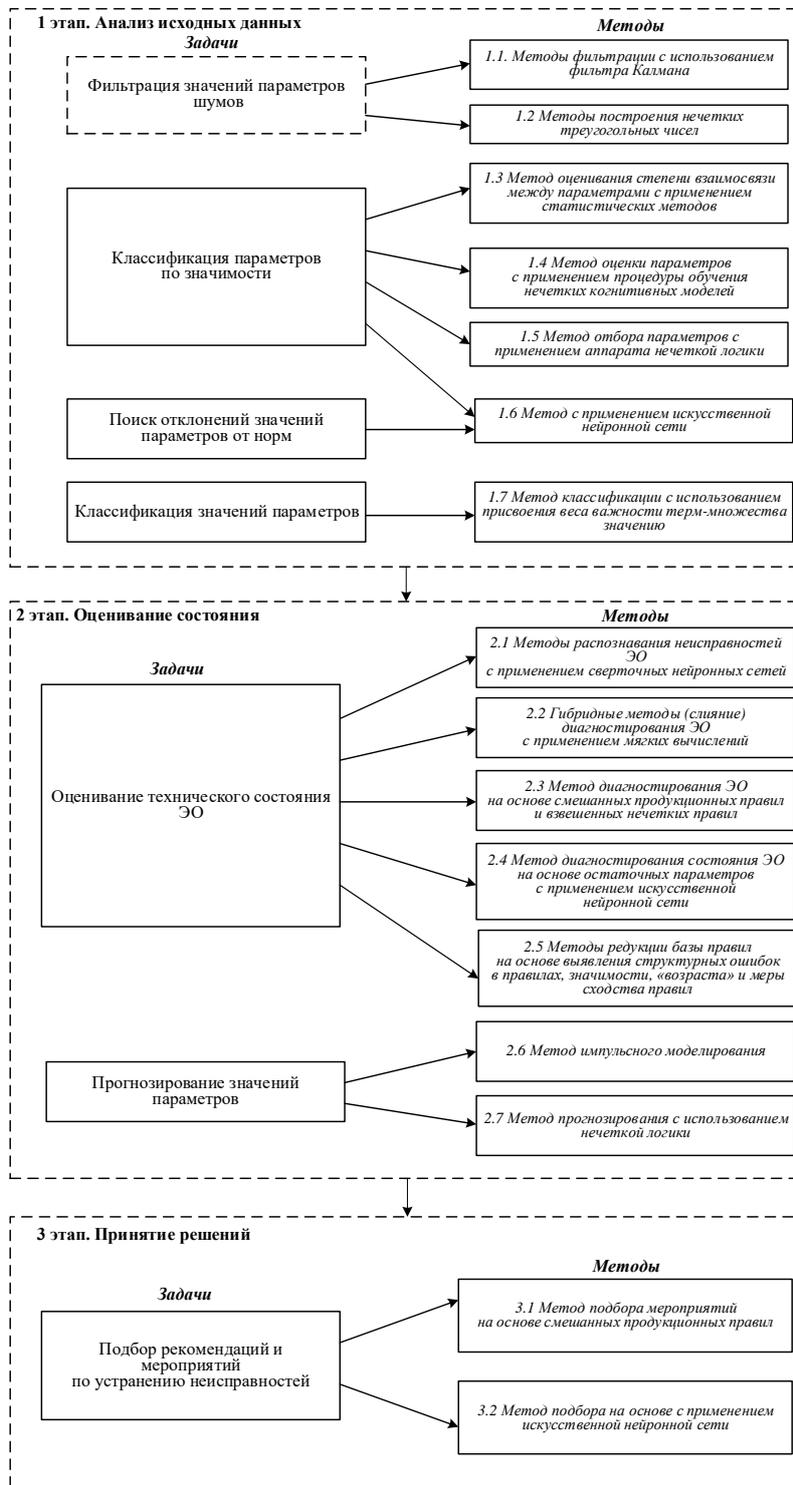


Рис. 2. Структура единого комплекса оценивания технического состояния ЭО

4) Идея метода 3.1 «Метод подбора рекомендаций и мероприятий на основе смешанных производственных правил» [18] заключается в построении таблицы влияния показателей качества электрической энергии, параметров на оборудование, и построении на их основе смешанных производственных правил. При этом каждое производственное правило имеет параметр, определяющий его значимость (предлагается устанавливать в соответствии с длиной правила и определять как:

$$CF_k = \max_k \{N_k\}, k = \overline{1; c}, \text{ где } c - \text{ количество производственных правил; } N_k - \text{ количество}$$

входных переменных в  $k$ -м производственном правиле) при выдаче перечня мероприятий, которые необходимо выполнить в первую очередь для предотвращения выхода из строя ЭО, полученный с помощью их обучения ( $CF_k^{new} = CF_k^{old} - \eta \cdot w_h \cdot CF_k^{old}$ ,  $w_h$  – сила влияния параметров на оборудование,  $\eta$  – скорость обучения,  $0 \leq \eta \leq 1$ ). Выбирается тот вариант мероприятий, где правило имеет наибольшее значение значимости.

Разработанный единый комплекс направлен на решение задач оценивания технического состояния ЭО, в основе которого лежат взаимосвязанные методы и модели, позволяет повысить точность полученных диагностических решений и предупредить выход ЭО из строя.

**Вычислительный эксперимент.** Оценивание технического состояния проводилось для асинхронного электродвигателя серии ВАО5К-450, 560. Для определения степени взаимосвязи между параметрами были применены различные статистические подходы, основанные на использовании рангового коэффициента корреляции Спирмена, коэффициентов ассоциативности. Результаты расчетов сводились в табл. 1 (за период 26.09.2022: 08:00 – 13:00 и 10.10.2022: 08:00 – 13:00), в которой максимальные значения коэффициентов выделены жирным. По совокупности таблиц вида 1, отнесенных к различным годам, формируется табл. 2, содержащая информацию о взаимосвязях между параметрами.

Таблица 1

Результаты расчета степени взаимосвязи

Год диагностирования  Подходы к оцениванию степени взаимосвязи (формула)	2022							
	Параметры							
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_7$	$X_8$	...	$X_{12}$
$S_1$	<b>0,81</b>	0,54	0,1	...	0,23	<b>0,92</b>	...	0,16
$S_2$	0,22	<b>0,75</b>	0,14	...	0,18	0,12	...	0,13
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_7$	0,12	0,13	<b>0,85</b>	...	<b>0,83</b>	0,1	...	<b>0,35</b>

В табл. 1  $x_1, x_2, x_3$  – соответственно отклонение напряжения по фазам  $A, B, C$ ;  $x_7$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;  $x_8$  – сопротивление статорной обмотки,  $x_{12}$  – температура в токоведущих (за исключением контактов и контактных соединений) и нетокведущих и металлические части, не изолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами.

Таблица 2

Таблица взаимосвязей между параметрами по данным 2022

Месяц диагностирования	Параметры							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_7$	$x_8$	...	$x_{12}$
апрель	0,35	0,65	0,17	...	0,63	0,74	...	0,21
июль	0,28	0,69	0,25	...	0,71	0,87	...	0,12
октябрь	0,33	0,61	0,37	...	0,74	0,89	...	0,16

Из табл. 2 следует, что параметры  $x_3$ ,  $x_7$  и  $x_{12}$  сильно влияют на состояние асинхронного электродвигателя, параметры  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_8$  можно при диагностировании не рассматривать.

После рассмотрения связей между параметрами осталось 12 параметров ( $x_1^*$  – напряжения фазы А;  $x_2^*$  – напряжения фазы В;  $x_3^*$  – напряжения фазы С;  $x_4^*$  – грозовые импульсные напряжения;  $x_5^*$  – несинусоидальность напряжения;  $x_6^*$  – исправность ТС АД;  $x_7^*$  – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;  $x_8^*$  – сопротивление статорной обмотки; ...  $x_{12}^*$  – температура в токоведущих (за исключением контактов и контактных соединений) и нетокведущих и металлических части, не изолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами). Данные параметры описывались совокупностью критериев:  $C_1$  – важность параметра;  $C_2$  – степень централизации;  $C_3$  – связность. Ставилась задача ранжирования параметров применительно к выбору наиболее значимых параметров для дальнейшего диагностирования оборудования [16].

Таким образом, при принятии решения наиболее важным является критерий степени централизации ( $C_2$ ) и критерий важности ( $C_3$ ). С учетом важности данных критериев получаются следующие нечеткие множества:

$$\tilde{C}_1^{\alpha_1} = \left\{ \frac{0,15}{x_1^*}, \frac{0,47}{x_2^*}, \frac{0,67}{x_3^*}, \frac{0,11}{x_4^*}, \frac{0,15}{x_5^*}, \frac{0,25}{x_6^*}, \frac{0,74}{x_7^*}, \frac{0,66}{x_8^*}, \dots, \frac{0,69}{x_{12}^*} \right\};$$

$$\tilde{C}_1^{\alpha_2} = \left\{ \frac{0,28}{x_1^*}, \frac{0,14}{x_2^*}, \frac{0,75}{x_3^*}, \frac{0,22}{x_4^*}, \frac{0,27}{x_5^*}, \frac{0,45}{x_6^*}, \frac{0,55}{x_7^*}, \frac{0,68}{x_8^*}, \dots, \frac{0,71}{x_{12}^*} \right\};$$

$$\tilde{C}_1^{\alpha_3} = \left\{ \frac{0,29}{x_1^*}, \frac{0,31}{x_2^*}, \frac{0,71}{x_3^*}, \frac{0,12}{x_4^*}, \frac{0,25}{x_5^*}, \frac{0,34}{x_6^*}, \frac{0,71}{x_7^*}, \frac{0,78}{x_8^*}, \dots, \frac{0,84}{x_{12}^*} \right\};$$

В результате пересечений критериев получается нечеткое множество

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,18}{x_1^*}, \frac{0,13}{x_2^*}, \frac{0,47}{x_3^*}, \frac{0,16}{x_4^*}, \frac{0,2}{x_5^*}, \frac{0,12}{x_6^*}, \frac{0,34}{x_7^*}, \frac{0,37}{x_8^*}, \dots, \frac{0,43}{x_{12}^*} \right\},$$

которое свидетельствует о значимых параметрах  $x_3^*$ ,  $x_7^*$ ,  $x_8^*$ ,  $x_{12}^*$ , поскольку они лучше других одновременно удовлетворяют всем критериям с учетом их важности.

Затем для оценивания технического состояния асинхронного электродвигателя подключались изображения, полученные с тепловизора. Данные изображения были обработаны с помощью сверточной нейронной сети, для определения точек на корпусе с предельными или аномальными значениями температуры. Температурные отклонения значительно влияют на работоспособность асинхронных элек-

тродвигателей и причины, которые их вызывают, связаны с повышением напряжения по фазам [19, 20], коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности и сопротивлением статорной обмотки. Данные причины были заложены в смешанные производственные правила для классификации неисправности асинхронного электродвигателя. Результаты исследования показали, что двигатель работает в перегруженном режиме.

Далее осуществлялось ранжирование смешанных производственных правил на основе параметра достоверности  $CF$ , который устанавливался в соответствии с длиной правила. Производственное правило, включающее большое количество входных переменных, получает ранг  $1/1$ , далее  $1/2$  и т.д.

Фрагмент разработанных смешанных производственных правил с рассчитанным параметром достоверности представлен ниже:

*Rule<sub>1</sub>*: ЕСЛИ  $U_A = \langle \text{нормальное} \rangle U_B = \langle \text{нормальное} \rangle$  и  $U_C = \langle \text{высокое} \rangle$  И «коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности» =  $\langle \text{превышен} \rangle$  И «сопротивлением статорной обмотки» =  $\langle \text{высокое} \rangle$  И асинхронные двигатели  $\langle \text{присутствуют} \rangle$  И «асинхронные двигатели с частотным преобразователем»  $\langle \text{отсутствуют} \rangle$  И «температура двигателя»  $\langle \text{высокая} \rangle$  ТО мероприятие =  $\langle 2 \text{ вариант} \rangle$  (1).

*Rule<sub>2</sub>*: ЕСЛИ  $U_A = \langle \text{нормальное} \rangle U_B = \langle \text{низкое} \rangle$  и  $U_C = \langle \text{нормальное} \rangle$  И «коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности» =  $\langle \text{нормальное} \rangle$  И «сопротивлением статорной обмотки» =  $\langle \text{нормальное} \rangle$  И асинхронные двигатели  $\langle \text{присутствуют} \rangle$  И «асинхронные двигатели с частотным преобразователем»  $\langle \text{отсутствуют} \rangle$  И «температура двигателя»  $\langle \text{повышенная} \rangle$  ТО мероприятие =  $\langle 1 \text{ вариант} \rangle$  (0,3).

*Rule<sub>3</sub>*: ЕСЛИ  $U_A = \langle \text{высокое} \rangle U_B = \langle \text{нормальное} \rangle$  и  $U_C = \langle \text{низкое} \rangle$  И «коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности» =  $\langle \text{превышен} \rangle$  И «сопротивлением статорной обмотки» =  $\langle \text{нормальное} \rangle$  И асинхронные двигатели  $\langle \text{присутствуют} \rangle$  И «асинхронные двигатели с частотным преобразователем»  $\langle \text{отсутствуют} \rangle$  И «температура двигателя»  $\langle \text{повышенная} \rangle$  ТО мероприятие =  $\langle 3 \text{ вариант} \rangle$  (0,5).

Результаты показали, что  $Rule_1 > Rule_3 > Rule_2$ , т.е. был выбран второй вариант мероприятий, который необходимо реализовать в первую очередь по предотвращению неисправностей оборудования. Под вторым вариантом рассматриваются следующие мероприятия: на работающем электродвигателе провести измерения токов по фазам  $A, B, C$ ; на отключенном от питания электродвигателе: провести измерения сопротивления изоляции по каждой фазе и сопротивления каждой фазы.

В табл. 3 приведены результаты сопоставления, полученных с использованием методов, принятых на предприятии и разработанного единого комплекса.

Таблица 3

## Результаты сопоставления

№	Наименование фактора	Методы, принятые на предприятии	Единый комплекс
1	Время, затраченное на принятие решений относительно технического состояния ЭО (день)	10	4
2	Количество исполнителей, участвующих при принятии решений относительно технического состояния ЭО (чел.)	7	4
3	Количество мероприятий, направленных на устранение неисправностей	8	3

Представленный единый комплекс с последовательным применением рассмотренных методов позволяет оперативному персоналу получить мероприятия по поиску и устранению неисправностей ЭО.

**Заключение.** В настоящей работе предложен системный подход к оцениванию технического состояния ЭО в условиях неточной и нечеткой информации, позволяющий рассматривать данный процесс как целостную и открытую систему. Это позволяет выделять основные подпроцессы оценивания технического состояния оборудования, создающие целостность для лица, принимающего решения; находить эффективные диагностические решения возникающих проблем, управлять возникшими изменениями во внешней и внутренней среде.

Предложена структура единого комплекса оценивания ЭО для интеллектуальных диагностических систем, устанавливающая последовательность решаемых задач и применяемых для них моделей, интеллектуальных методов, подходов. Данный комплекс позволяет предотвратить преждевременный выход ЭО из строя, повысить информативность ситуаций принятия решений и достоверность заключений о техническом состоянии оборудования в условиях неполной и нечеткой информации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plotnikova I., Sheveleva E., Narimanov R. Application of the system for electrical equipment diagnostics and its analysis // *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science.* – 2023. – P. 111-119.
2. Пархоменко П.П., Сагомонян Е.С. и др. Основы технической диагностики. – М.: Энергия, 1976. – 319 с.
3. Русан В.И., Шварц К.Ю. Диагностика электрооборудования – учебно-методический комплекс. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2021. – 296 с.
4. Исмаилов А.У. Современные методы диагностики и мониторинга состояния электрооборудования для повышения надежности электроэнергетических систем // *Уральский научный вестник.* – 2023. – Т. 9, № 8. – С. 114-117.
5. Ivanov G., Spasova A., Mateev V., Marinova I. Applied complex diagnostics and monitoring of special power transformers // *Energies.* – 2023. – P. 1-24.
6. Yakovlev D. An intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment using WI-FI // *Power engineering: economics, technique, ecology.* – 2023. – <https://www.researchgate.net/publication/375729870>.
7. Мурзинов В.Л., Мурзинов Ю.В., Мурзинов П.В., Кочерженко Д.В. Contactless diagnostics of working automated process equipment // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* – 2023. – P. 23-27.
8. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 81 с.
9. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. – 7 изд. Министерство энергетики Российской Федерации, приказ от 8 июля 2002 г. № 204. – М., 2003. – 692 с.
10. Xu Y., Wei Z., Li Z. Neural network robustness evaluation based on interval analysis // *Neural Comput & Applic.* – 2023. – 35. – P. 19481-19496.
11. Wang Z., Xu Y., Han L., Zhu T., Sun L. Multivariate long-term traffic forecasting with graph convolutional network and historical attention mechanism // *Knowledge Science, Engineering and Management. Lecture Notes in Computer Science.* – 2023. – Vol. 14120. – P. 112-123.
12. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Development of a unified diagnostic complex of electrical equipment for intelligent systems // *Proceedings - 2023 International Russian Automation Conference.* – 2023. – P. 209-213.
13. Pyankov O.V., Terentyev A.A. Checking the adequacy of the expert estimates processing algorithm using slice-matrices // *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* – 2021. – Vol. 8, No. 2. – P. 56-63.

14. Дулкарнаев М.Р., Малявко Е.А., Горбоконенко О.А., Сапрыкина К.М., Семенова Е.Е., Васечкин Д.А., Урванцев С.И. Комплексирование результатов динамического маркерного мониторинга, метода ранговой корреляции и гибридных цифровых моделей для оценки влияния скважин // Бурение и нефть. – 2021. – № 10. – С. 32-37.
15. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Selection of basic parameters for the diagnosis of industrial electrical equipment using computer technology // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2022. – P. 982-986.
16. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Method for selecting diagnostic parameters using information technologies under a set of various types of information // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2023. – P. 916-920.
17. Колоденкова А.Е., Верещagina С.С. Подход к проверке базы знаний интеллектуальных систем диагностирования промышленного оборудования // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (91). – С. 18-27.
18. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Dobrova V.V., Muntyan E.R., Olgeizer I.A. Mapping out the measures to prevent the failure of electrical equipment // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry". – 2022. – P. 437-443.
19. Валуллин К.Р., Тушев С.И. Алгоритм пересчета температуры асинхронного двигателя на основе эквивалентной тепловой схемы // Энергетические системы. – 2022. – № 2. – С. 42-48.
20. Фёдоров М.М., Алексеев Е.Р. Методы расчета теплового состояния асинхронных двигателей при изменении напряжения сети // Известия ТРТУ. 2002. – № 2 (25). – С. 60-64.

## REFERENCES

1. Plotnikova I., Sheveleva E., Narimanov R. Application of the system for electrical equipment diagnostics and its analysis, *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science*, 2023, pp. 111-119.
2. Parkhomenko P.P., Sagomonyan E.S. *i dr. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki* [Fundamentals of technical diagnostics]. Moscow: Energiya, 1976, 319 p.
3. Rusan V.I., Shvarts K.Yu. Diagnostika elektrooborudovaniya – uchebno-metodicheskiy kompleks [Diagnostics of electrical equipment - educational and methodological complex]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiiy universitet, 2021, 296 p.
4. Ismailov A.U. Sovremennyye metody diagnostiki i monitoringa sostoyaniya elektrooborudovaniya dlya povysheniya nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem [Modern methods of diagnostics and monitoring of the condition of electrical equipment to improve the reliability of electrical power systems], *Ural'skiy nauchnyy vestnik* [Ural Scientific Bulletin], 2023, Vol. 9, No. 8, pp. 114-117.
5. Ivanov G., Spasova A., Mateev V., Marinova I. Applied complex diagnostics and monitoring of special power transformers, *Energies*, 2023, pp. 1-24.
6. Yakovlev D. An intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment using WI-FI, *Power engineering: economics, technique, ecology*, 2023. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/375729870>.
7. Murzinov V.L., Murzinov Yu.V., Murzinov P.V., Kocherzhenko D.V. Contactless diagnostics of working automated process equipment [Contactless diagnostics of working automated process equipment], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2023, pp. 23-27.
8. GOST 33073-2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of the quality of electrical energy in general purpose power supply systems]. Moscow: Standartinform, 2014, 81 p.
9. PUE. Pravila ustroystva elektroustanovok [PUE. Rules for electrical installations]. 7th ed. Ministry of Energy of the Russian Federation, order dated July 8, 2002, No. 204. Moscow, 2003, 692 p.
10. Xu Y., Wei Z., Li Z. Neural network robustness evaluation based on interval analysis, *Neural Comput & Applic*, 2023, 35, pp. 19481-19496.

11. Wang Z., Xu Y., Han L., Zhu T., Sun L. Multivariate long-term traffic forecasting with graph convolutional network and historical attention mechanism, *Knowledge Science, Engineering and Management. Lecture Notes in Computer Science*, 2023, Vol. 14120, pp. 112-123.
12. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Development of a unified diagnostic complex of electrical equipment for intelligent systems, *Proceedings - 2023 International Russian Automation Conference*, 2023, pp. 209-213.
13. Pyankov O.V., Terentyev A.A. Checking the adequacy of the expert estimates processing algorithm using slice-matrices, *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2021, Vol. 8, No. 2, pp. 56-63.
14. Dulkarnaev M.R., Malyavko E.A., Gorbokonenko O.A., Saprykina K.M., Semenova E.E., Vasechkin D.A., Urvantsev S.I. Kompleksirovanie rezultatov dinamicheskogo markernogo monitoringa, metoda rangovoy korrelyatsii i gibridnykh tsifrovyykh modeley dlya otsenki vliyaniya skvazhin [Integrating the results of dynamic marker monitoring, the rank correlation method and hybrid digital models for assessing the impact of wells], *Burenie i nefi'* [Drilling and Oil.], 2021, No. 10, pp. 32-37.
15. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Selection of basic parameters for the diagnosis of industrial electrical equipment using computer technology, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2022, pp. 982-986.
16. Kolodenkova A., Vereshchagina S. Method for selecting diagnostic parameters using information technologies under a set of various types of information, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2023, pp. 916-920.
17. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Podkhod k proverke bazy znaniy intellektual'nykh sistem diagnostirovaniya promyshlennogo oborudovaniya [An approach to checking the knowledge base of intelligent systems for diagnosing industrial equipment], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Transport], 2023, No. 3 (91), pp. 18-27.
18. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Dobrova V.V., Muntyan E.R., Olgeizer I.A. Mapping out the measures to prevent the failure of electrical equipment, *Proceedings of the Sixth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"*, 2022, pp. 437-443.
19. Valiullin K.R., Tushev S.I. Algoritm perescheta temperatury asinkhronnogo dvigatelya na osnove ekvivalentnoy teplovoy skhemy [Algorithm for recalculating the temperature of an asynchronous motor based on an equivalent thermal circuit], *Energeticheskie sistemy* [Energy systems], 2022, No. 2, pp. 42-48.
20. Fedorov M.M., Alekseev E.R. Metody rascheta teplovogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigateley pri izmenenii napryazheniya seti [Methods for calculating the thermal state of asynchronous motors when the network voltage changes], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 200, No. 2 (25), pp. 60-64.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Верещагина Светлана Сергеевна** – Самарский государственный технический университет; e-mail: werechaginass@mail.ru; г. Самара, Россия; кафедра информационных технологий; к.т.н.; доцент.

**Vereshchagina Svetlana Sergeevna** – Samara State Technical University; e-mail: werechaginass@mail.ru; Samara, Russia; the department of information technology; cand. of eng. sc.; associate professor.