

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.10

УДК 681.518.3

Хиеу Ву Динь, Р.А. Файзрахманов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ

Оценка технического состояния узлов отдельного оборудования, технического парка, а также оборудования всего предприятия является задачей актуальной, и показатель «индекс технического состояния» широко применяется. Известны различные методики в России и за рубежом, основанные на методе анализа иерархии Саати, классификации возможных неисправностей оборудования и на других экспертных методах. В России широко применяется методика, утвержденная приказом Министерства энергетики РФ № 676 от 26.07.2017. Программный модуль «индекс технического состояния» внедрен, в частности, в корпоративную информационную систему «Галактика ЕАМ». В работе рассматривается предложенная авторами модифицированная модель «индекс технического состояния» в сравнении с методикой Минэнерго. **Целью работы** является обоснование применимости предложенной авторами модифицированной модели «индекс технического состояния» оборудования для практического использования при оценке технического состояния оборудования. Предложенная авторами модель «индекс технического состояния» отличается от существующих тем, что параметры, определяемые на основе экспертных оценок при расчете «индекс технического состояния», заменены на объективные характеристики, определяемые на основе функциональной модели конструкции оборудования и статистических данных эксплуатационных параметров. **Методы:** при вычислении оценок «индекс технического состояния» применены методы анализа иерархии Саати, статистики, а также теории графов. Расчеты выполнены на основе базы данных эксплуатационных параметров турбореактивных двухконтурных двигателей NASA за 2008 год. **Результаты:** предложенная модель оценки «индекс технического состояния» по сравнению с моделью Минэнерго при одних и тех же данных показала лучшие результаты на примере расчета «индекс технического состояния» трех двигателей, что продемонстрировано соответствующими графиками и пояснениями к ним.

Ключевые слова: информационная система поддержки принятия решений, техническое обслуживание и ремонт, индекс технического состояния, модифицированная модель индекса технического состояния.

Hieu Wu Din, R.A. Fayzrakhmanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODIFIED MODEL OF THE SYSTEM TECHNICAL CONDITION INDEX. ALGORITHM FOR CALCULATION AND APPLICABILITY ANALYSIS

Assessing the technical condition of components of individual equipment, technical park, as well as equipment of the entire enterprise is a topical task and the indicator "technical condition index" is widely used. Various methods are known in Russia and abroad, based on the method of analyzing the Saaty hierarchy, classification of possible equipment faults and other expert methods. In Russia, the methodology approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 676 dated July 26, 2017 is widely used. The "technical condition index" software module has been implemented, in particular, into the "Galaktika EAM" corporate information system. The paper examines the modified "technical condition index" model proposed by the authors in comparison with the methodology of the Ministry of Energy. **The purpose** of the work is to substantiate the applicability of the modified "technical condition index" equipment model proposed by the authors for practical use in assessing the technical condition of equipment. The "technical condition index" model proposed by the authors differs from existing ones in that the parameters determined on the basis of expert assessments when calculating "technical condition index" are replaced by objective characteristics determined on the basis of a functional model of the equipment design and statistical data of operational parameters. **Methods:** when calculating "technical condition index" estimates, methods of Saaty hierarchy analysis, statistics, and graph theory were used. Calculations were performed based on the NASA database of operational parameters of turbojet bypass engines for 2008. **Results:** the proposed model for assessing the "technical condition index" compared to the model of the Ministry of Energy on the same data showed better results using the example of calculating the "technical condition index" of three engines, which is demonstrated by the corresponding graphs and explanations for them.

Keywords: decision support information system, maintenance and repair, technical condition index, modified technical condition index model.

Введение

Надежность работы технических систем в современных условиях во многом определяется использованием современных методов обработки данных и информационных систем поддержки принятия решений, как показано, в частности, в [1].

Эффективность стратегий технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на основе оценки технического состояния (ТС) с использованием современных методов, таких как метод анализа иерархии Саати, методов экспертных оценок, доказана практикой, и на сегодняшний день эти методы применяются на многих промышленных предприятиях и обеспечивают оптимизацию затрат, связанных с ТОиР и эксплуатацией оборудования [2–6]. На это направлено Постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности

объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей», а также методика оценки индекса технического состояния (ИТС) основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утвержденная приказом Министерства энергетики РФ № 676 от 26.07.2017. Оценка ТС оборудования является обязательным условием, позволяющим перейти от организации ТОиР по планово-предупредительному методу к ТОиР по фактическому ТС [2, 7, 8] в энергетике, но с успехом могут применяться в других отраслях.

Для сложного оборудования и технических систем в целом существует несколько подходов к оценке ТС: подход на основе детерминированных моделей, статистико-вероятностный подход, подход на основе экспертных знаний, комбинированный подход [22]. Подход на основе детерминированной модели часто сложен для реализации и не подходит для оценки ТС оборудования или систем в процессе эксплуатации, поскольку требует очень глубокого понимания изменений физико-химических свойств в устройстве в течение рабочего времени [9]. Статистико-вероятностный подход имеет то преимущество, что не требует слишком много знаний об устройстве, а, наоборот, требует большого количества статистических данных, и результаты оценки будут сильно зависеть от наличия в данных случайных шумов [10–15]. Преимущество экспертного подхода основано на знаниях и опыте экспертов, понимании сложных систем, не требует большого объема статистических данных. Но при этом эксперты могут иметь разный уровень знаний о системе, следовательно, результат будет подвержен влиянию субъективной оценки каждого эксперта [16–20]. Комбинированный подход во многих конкретных случаях позволил преодолеть недостатки и усилить преимущества предыдущих подходов [7, 21, 22].

В статье рассмотрена предложенная авторами модифицированная модель ИТС, описание которой приведено в [7] с целью обоснования ее применимости для практического использования при оценке технического состояния оборудования.

Модифицированная модель индекса технического состояния системы и алгоритм расчета

Пусть рассматриваемое техническое оборудование состоит из n взаимосвязанных функциональных узлов и представлено в виде графа на рис. 1.

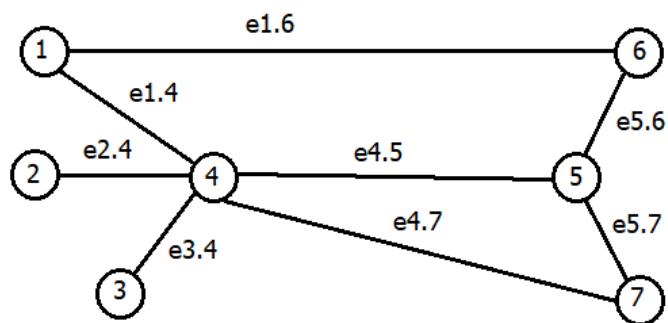


Рис. 1. Функциональная структурная модель технического оборудования

При этом вершины (1... n) характеризуют функциональные узлы в устройстве, $e_{i,j}$ характеризует наличие функциональных связей между узлами i и j . Состояние любого функционального i -го узла описывается с помощью m_i контролируемых параметров. Каждый контролируемый параметр, а также каждый функциональный узел будут иметь определенный вес, характеризующий роль, которую они играют в функциональном узле или во всем оборудовании.

Теоретически ИТС имеет значение, изменяющееся от 100 до 0 (в процентах), где 100 – наилучшее ТС, когда начинает вводиться в эксплуатацию вполне исправное оборудование, а 0 – наихудшее теоретическое значение показателя ТС, когда оборудование нельзя эксплуатировать дальше. В данной работе практически приемлемым считается интервал [50...100] согласно методике Минэнерго, когда качественный уровень технического состояния оборудования оценивается значениями «удовлетворительный», «хороший» и «очень хороший», и в общем является предметом отдельного исследования для конкретного оборудования.

Сложное техническое оборудование состоит из основных функциональных узлов, каждый функциональный узел играет определенную роль в обеспечении работоспособности всего устройства. ИТС оборудования рассчитывается на основе ИТС основных функциональных узлов рассматриваемого оборудования и их весов, а ИТС каждого основного функционального узла определяется на основе весов контролируемых параметров, характеризующих изменение состояния узлов.

Конструктивный подход к оценке ИТС оборудования основан на модели, учитывающей конструктивные, технологические и стати-

стические особенности технической системы. Функциональная структура оборудования для моделирования ИТС имеет вид, показанный на рис. 2.

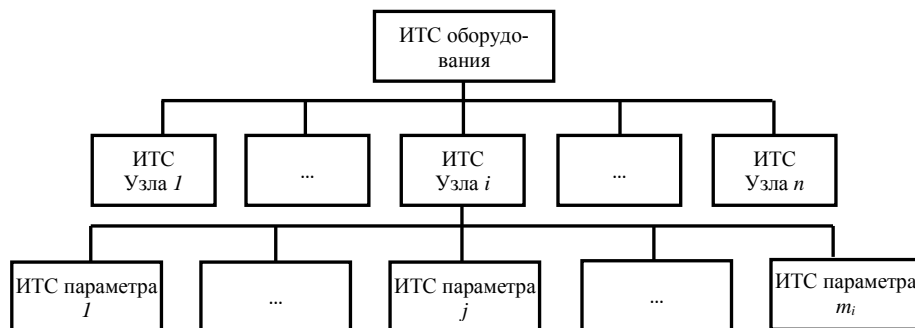


Рис. 2. Функциональная структура оборудования для моделирования ИТС

ИТС объекта (I), а также основных функциональных узлов и параметров управления рассчитываются по формулам (1), (2) и (3а) или (3б) соответственно.

$$I = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot I_i), \quad (1)$$

где n – число основных функциональных узлов в объекте; w_i – вес i -го основного функционального узла; I_i – ИТС i -го основного функционального узла.

$$I_i = \sum_{j=1}^{m_i} (w_{i,j} \cdot I_{i,j}), \quad (2)$$

где m_i – количество контролируемых параметров ТС i -го узла; $I_{i,j}$ – ИТС j -го параметра i -го узла; $w_{i,j}$ – вес j -го параметра i -го узла.

$$I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,j \min})100}{x_{i,j \max} - x_{i,j \min}}, \quad (3a)$$

$$I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,j \max})100}{x_{i,j \min} - x_{i,j \max}}, \quad (3б)$$

где $x_{i,j \max}$, $x_{i,j \min}$ – максимальное и минимальное значения j -го параметра i -го узла, определенные по паспортным данным или данным испытаний. Формула (3а) применяется к параметрам, которые постепенно уменьшаются с течением времени в процессе работы устройства.

В случае постепенного увеличения параметров в течение рабочего времени применяется формула (3б).

Алгоритм расчета модифицированной модели оценки ИТС на основе конструктивного подхода представлен на рис. 3. Здесь использованы следующие обозначения: $x_{i,j0}$, $x_{i,jT}$ – начальное и текущее значения j -го параметра i -го узла; $\bar{x}_{i,j}$ – среднее значение j -го параметра ($j = 1..m_i$) i -го узла ($i = 1..n$); N_{ij} – величина объема выборки j -го параметра ($j = 1..m_i$) i -го узла ($i = 1..n$); $s_{i,j}$ – стандартное отклонение j -го параметра ($j = 1..m_i$) i -го узла ($i = 1..n$); $v_{i,j}$ – коэффициенты вариации j -го параметра ($j = 1..m_i$) i -го узла ($i = 1..n$); $w_{i,j}$ – вес j -го параметра ($j = 1..m_i$) i -го узла ($i = 1..n$); p – количество треугольников, из которых линия $e_{i,j}$ является ребром в функциональной структурной схеме технического оборудования; Iv_{ij} – индекс вариации линии $e_{i,j}$; k_i , k_j – степени узлов i и j , определяются как число связей данного узла с другими; U_{ij} – отражает связность линии $e_{i,j}$; $I_{e_{i,j}}$ – степень важности линии связи $e_{i,j}$ в системе; W_{ij} – оценка вклада узла i в важность линии $e_{i,j}$; L_i , L_j – коэффициенты важности узлов i , j ; C – множество узлов, связанных с узлом i ; $a_{i,j}$ – характеризует важность узла i по сравнению с узлом j ; w_i – вес i -го узла ($i = 1..n$) рассматриваемого оборудования; I – ИТС технического оборудования.

Основные формулы расчета перечисленных выше параметров приведены в блоках рис. 3. В блоках 3, 4 вычисляются ИТС параметров. В блоке 5 выполняется расчет стандартного отклонения параметров, в целях нормирования вместо стандартного отклонения применяются коэффициенты вариации (блок 6). Расчет ИТС узлов выполнен в блоке 8. В блоках 9–13 вычисляются параметры на основе метода *DIL* (*Degree Importance Line*) [23], основанного на анализе структуры графа. Расчеты весов узлов и ИТС оборудования выполняются в блоках 15 и 16 соответственно. Значения параметров в блоках 7 и 14 в соответствии с алгоритмом Минэнерго рассчитываются с привлечением экспертов. В предлагаемом авторами алгоритме блок 7 рассчитывается на основе статистических характеристик параметров, а блок 14 – на основе структурных характеристик графа с применением метода *DIL* [7, 23].

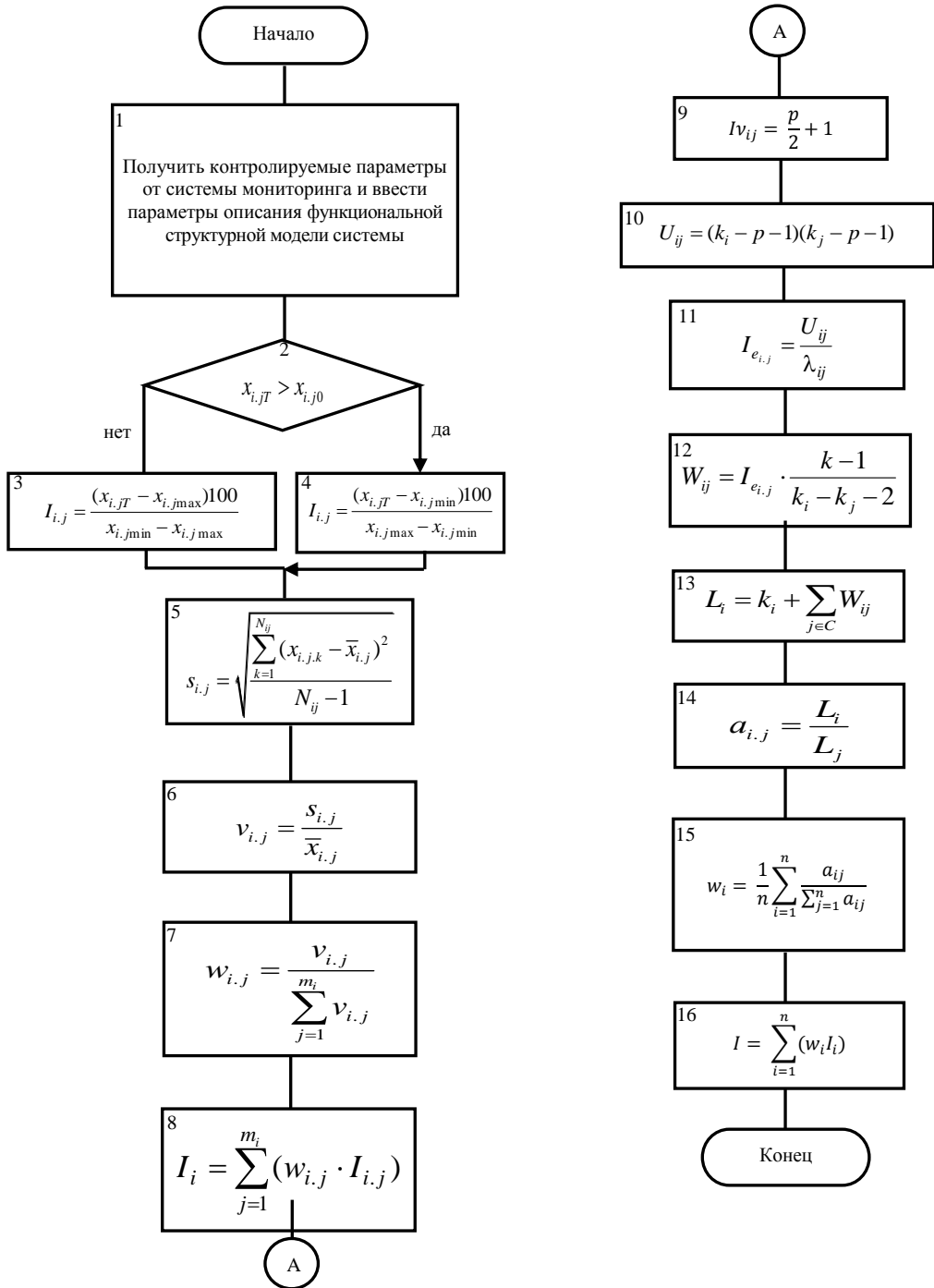


Рис. 3. Модифицированный алгоритм расчета ИТС

Предлагаемый алгоритм в сравнении с алгоритмом Минэнгеро

По методике Минэнгеро России ИТС i -го узла рассчитывается по формуле (4) [24, 25]:

$$I_i = 100 \sum_{j=1}^{m_i} (w_{i,j} \cdot \text{ОПГ}_{i,j}) / 4, \quad (4)$$

где ОПГ $_{i,j}$ – характеристический показатель по износу j -го параметра i -го узла, этот показатель определяют по шкалам 0, 1, 2, 3, 4 соответственно по табл. 1 [24–25].

Таблица 1

Шкалы показателя ОПГ $_{i,j}$

ОПГ $_{i,j}$				
0	1	2	3	4
$1,0 < \frac{\Delta_T}{\Delta_D}$	$0,8 < \frac{\Delta_T}{\Delta_D} \leq 1,0$	$0,4 < \frac{\Delta_T}{\Delta_D} \leq 0,8$	$0,2 < \frac{\Delta_T}{\Delta_D} \leq 0,4$	$0 < \frac{\Delta_T}{\Delta_D} \leq 0,2$

Δ_T – отклонение фактических значений параметров; Δ_D – предельно-допустимые значения, определяются по формулам:

$$\Delta_D = x_{i,j\max} - x_{i,j\min}, \quad (5)$$

$$\Delta_T = x_{i,jT} - x_{i,j0}, \quad (6)$$

где $x_{i,j0}$, $x_{i,jT}$ – начальное и текущее значения j -го параметра i -го узла; $x_{i,j\max}$, $x_{i,j\min}$ – максимальное и минимальное значения j -го параметра i -го узла.

ИТС оборудования по методике Минэнгеро России рассчитывается согласно формуле, приведенной в блоке 16 алгоритма. Сравнительная оценка предлагаемого алгоритма с алгоритмом расчета ИТС Минэнгеро выполнена для турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД). В качестве основных функциональных узлов ТРДД в [26] выделены: вентилятор (ВЕН), компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), турбина высокого давления (ТВД), турбина низкого давления (ТНД). Граф, описывающий взаимосвязь функциональных узлов, показан на рис. 4. Основным функциональным узлом, т.е. основным устройствам, соответствуют вершины 1–5 графа.

Перечни основных функциональных узлов, соответствующих им контролируемых параметров, весов параметров и весов узлов, используемых для оценки ИТС ТРДД, представлены в табл. 2.

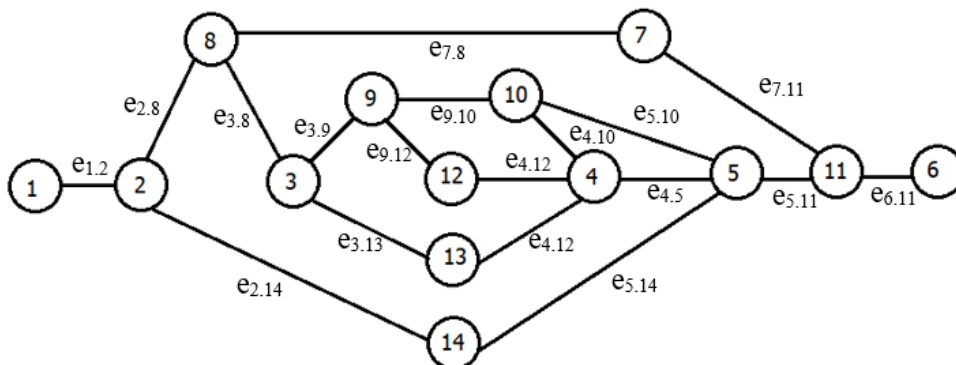


Рис. 4. Функциональная структурная схема ТРДД в виде графа: 1 – ВЕН, 2 – КНД, 3 – КВД, 4 – ТВД, 5 – ТНД, 6 – выходное устройство, 7 – канал, 8, 9, 10 – отбор газа, 11 – смеситель, 12 – камера сгорания, 13, 14 – отбор мощности

Таблица 2

Основные функциональные узлы, контролируемые параметры, веса параметров и веса узлов, используемые для оценки ИТС ТРДД

Номер узла	Название узла	Параметр для оценки ТС узла	Вес параметра	Вес узла
1	ВЕН	Физическая скорость вентилятора ($x_{1,1}$)	$w_{1,1}$	w_1
2	КНД	Суммарная температура на выходе компрессора низкого давления ($x_{2,1}$)	$w_{2,1}$	w_2
3	КВД	Суммарная температура на выходе компрессора высокого давления ($x_{3,1}$)	$w_{3,1}$	w_3
		Суммарное давление на выходе компрессора высокого давления ($x_{3,2}$)	$w_{3,2}$	
		Статическое давление на выходе компрессора высокого давления ($x_{3,3}$)	$w_{3,3}$	
4	ТВД	Стравливания охлаждающей жидкости турбины высокого давления ($x_{4,1}$)	$w_{4,1}$	w_4
5	ТНД	Суммарная температура на выходе турбины низкого давления ($x_{5,1}$)	$w_{5,1}$	w_5
		Стравливания охлаждающей жидкости турбины низкого давления ($x_{5,2}$)	$w_{5,2}$	

Для расчета ИТС устройства ТРДД используется набор данных *FD001 NASA* [27], содержащий информацию о рабочих параметрах 100 двигателей с момента их ввода и до вывода из эксплуатации. На основе этих данных выполнен расчет ИТС для трех двигателей по предлагаемому алгоритму и утвержденной методике Минэнерго. Расчет выполнен для 154 циклов для двигателя 1, 231 цикла для двигателя 2 и 147 циклов для двигателя 3, часть данных с характерными значениями представлена в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета ИТС двигателей 1, 2, 3

Двигатель 1			Двигатель 2			Двигатель 3		
<i>T</i> (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)	<i>T</i> (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)	<i>T</i> (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)
1	99.24	100.00	1	100.00	100.00	1	99.60	100.00
...
86	87.42	100.00	86	90.36	100.00	86	90.54	100.00
87	87.19	100.00	87	90.28	100.00	87	90.32	100.00
88	86.96	100.00	88	90.21	100.00	88	90.08	100.00
...
97	84.60	100.00	97	89.54	100.00	97	87.52	100.00
98	84.30	100.00	98	89.46	100.00	98	87.18	100.00
99	83.99	100.00	99	89.38	100.00	99	86.83	97.35
100	83.68	93.05	100	89.30	100.00	100	86.47	97.35
101	83.35	93.05	101	89.21	100.00	101	86.09	97.35
102	83.02	93.05	102	89.13	100.00	102	85.70	96.66
103	82.68	86.90	103	89.05	100.00	103	85.30	96.66
...
113	78.77	81.58	113	88.12	100.00	113	80.53	90.05
114	78.32	81.58	114	88.02	100.00	114	79.97	90.05
115	77.87	81.58	115	87.91	100.00	115	79.40	83.10
116	77.40	81.58	116	87.81	100.00	116	78.81	83.10
117	76.93	81.58	117	87.70	100.00	117	78.21	83.10
...
127	71.55	75.00	127	86.51	100.00	127	71.23	75.00
128	70.95	75.00	128	86.38	100.00	128	70.44	75.00
129	70.33	75.00	129	86.25	100.00	129	69.63	75.00
130	69.70	75.00	130	86.11	100.00	130	68.79	75.00
...
137	64.95	75.00	137	85.08	100.00	137	62.41	67.82
138	64.21	75.00	138	84.92	100.00	138	61.42	67.82
139	63.46	75.00	139	84.76	100.00	139	60.40	60.18
140	62.70	75.00	140	84.59	100.00	140	59.37	58.10
141	61.93	72.19	141	84.43	100.00	141	58.31	53.97
142	61.14	68.85	142	84.25	100.00	142	57.23	53.97
148	56.09	51.80	148	83.16	95.88	148	50.30	50.00
...
152	52.41	50.00	164	79.58	90.75	–	–	–
153	51.45	50.00	165	79.33	90.75	–	–	–
154	50.48	50.00	166	79.06	83.80	–	–	–
–	–	–	–	–	–
–	–	–	192	70.55	75.00	–	–	–

Окончание табл. 3

Двигатель 1			Двигатель 2			Двигатель 3		
T (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)	T (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)	T (номер цикла)	ИТС по предлагаемой методике (%)	ИТС по методике Минэнерго (%)
–	–	–	193	70,15	75,00	–	–	–
–	–	–	209	62,95	70,88	–	–	–
–	–	–	–	–	–
–	–	–	229	51,56	50,00	–	–	–
–	–	–	230	50,91	50,00	–	–	–
–	–	–	231	50,26	50,00	–	–	–

Графики изменения ИТС по циклам (T) для трех двигателей (см. табл. 3) приведены на рис. 5.

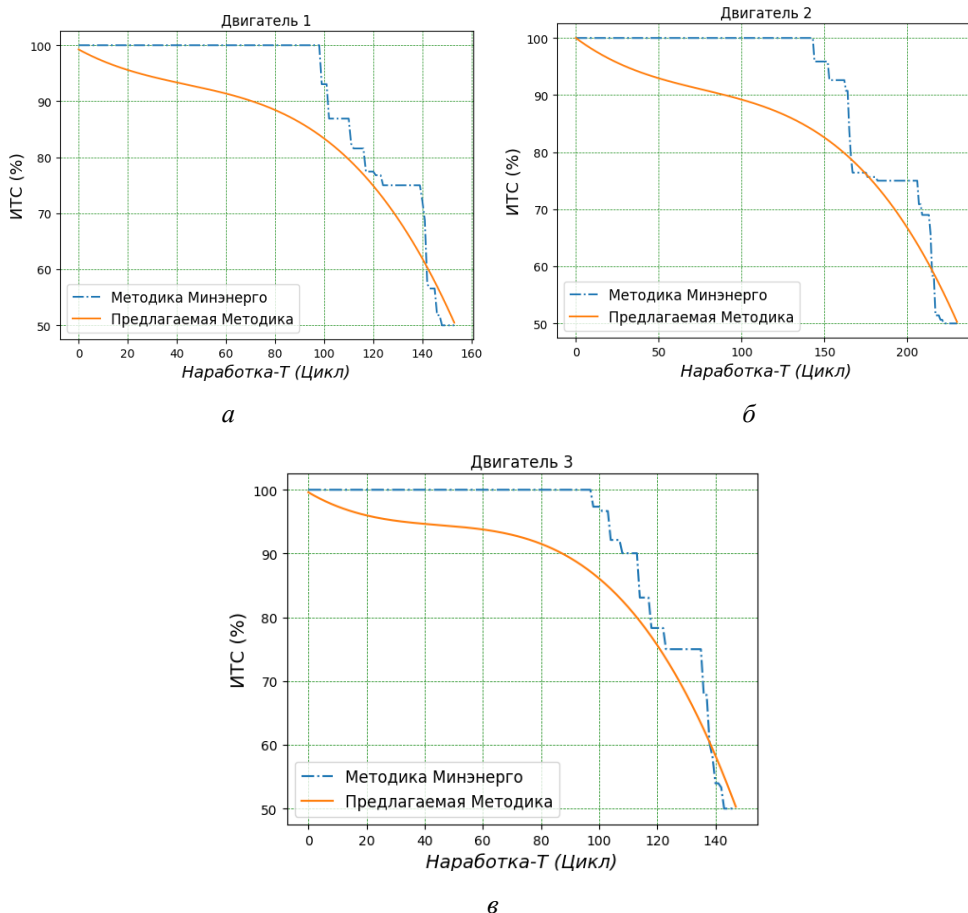


Рис. 5. Графики изменения ИТС двигателей 1, 2, 3 по циклам по предлагаемой методике и методике Минэнерго

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

Графики показывают, что в целом по сравниваемым алгоритмам значение ИТС за одинаковое количество циклов уменьшилось со 100 до 50 %, и они имеют одинаковые тенденции к изменению. В табл. 4, согласно методике Минэнерго, приведены виды работ в зависимости от значений ИТС [24–25]. Эти значения зависят от особенностей предприятия, от характеристик используемого оборудования.

Таблица 4

Виды технического состояния и технического воздействия

ИТС	Вид ТС	Вид технического воздействия
≤ 25	Критическое (Красный)	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
$25 \leq 50$	Неудовлетворительное (Оранжевый)	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$50 \leq 70$	Удовлетворительное (Желтый)	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$70 \leq 85$	Хорошее (Зеленый)	По результатам планового диагностирования
$85 \leq 100$	Очень хорошее (Т-зеленый)	Плановое диагностирование

Если данную таблицу воздействий взять за основу, то для ИТС, изменяющихся в пределах от 70 до 100, которым соответствуют оценки «хорошо» и «очень хорошо», можно применять плановые мероприятия. При этом до достижения значения ИТС ≈ 70 двигатели проработают:

- а) по предлагаемой методике соответственно 129, 193, 128 циклов;
- б) по методике Минэнерго соответственно 142, 209, 137 циклов.

График ИТС по методике Минэнерго изменяет форму скачкообразно, что можно объяснить наличием субъективного фактора при оценке ИТС и использованием дискретной математической модели. ИТС, рассчитываемый по предложенному алгоритму, изменяется плавно, постепенно уменьшаясь с течением времени работы, что может быть объяснено процессом постепенного износа узлов оборудования.

Резкое изменение значения ИТС по модели Минэнерго может быть объяснено только поломкой, следовательно, выходом из строя оборудования. По методике Минэнерго невозможно обнаружить приближения ИТС к границам диапазонов ИТС, т.е. возникновения предостерегающих ситуаций.

Это свидетельствует о том, что контрольное время для выполнения мероприятий по техобслуживанию для значения ИТС ≈ 70 по предложенной методике наступает на (6–10) % циклов раньше, следовательно, будет обеспечиваться более надежное функционирование оборудования и не потребуются дожидаться отказов.

Например, как показано на рис. 5, а, достижение ИТС ≈ 87 по предлагаемой методике наступает при $T = 87$, а по методике Минэнерго при $T = 103$, но резкий скачок графика может свидетельствовать о возможности поломки двигателя. Поэтому, если планируется техобслуживание при ИТС ≈ 87 , то лучше выполнить его по предложенной методике при $T = 87$.

График ИТС по предлагаемой модели расчета показывает, что он позволяет прогнозировать ИТС устройства в следующий момент времени на основе результатов предыдущих расчетов, в то время как по методике Минэнерго сделать это нельзя.

Заключение

В работе обосновано преимущество предложенной модели расчета ИТС оборудования по сравнению с моделью Минэнерго.

Особенность предложенной модели, названной авторами «модифицированная модель ИТС», заключается в том, что в модели Минэнерго используют экспертные оценки параметров, а в предложенной модели – статистические характеристики эксплуатационных параметров узлов и конструктивные характеристики функциональной модели оборудования.

Благодаря непрерывному изменению графика предложенный алгоритм расчета ИТС по сравнению со ступенчатым изменением при расчете по методике Минэнерго позволяет контролировать уровень ИТС и более оперативно, и с опережением, получить информацию о необходимости выполнения работ по техническому обслуживанию оборудования, что позволит не допустить поломки оборудования и его узлов.

Библиографический список

1. Шуринова, Д.А. Анализ целесообразности применения нейронных сетей для определения годности холодильного прибора на стадии приёмо-сдаточных испытаний и автоматической классификации причины брака / Д.А. Шуринова, А.В. Мурыгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 173–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.09
2. Гаврилюк, Е.А. Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 121–126.
3. Левин, В.М. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию / В.М. Левин, Н.П. Гужов, Д.А. Боярова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 39–51. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51
4. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system / S. Khuntia, J.L. Rueda Torres, S. Bouwman, M. van der Meijden // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2016. – № 26 (10). – P. 2123–2133. DOI: 10.1002/etep.2193
5. Герике, Б.Л. Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля / Б.Л. Герике, И.Л. Абрамов, П.Б. Герике // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 1 (65). – С. 11–14.
6. Иванов, В.А. Особенности подходов к техническому обслуживанию и ремонту оборудования в непрерывном производстве / В.А. Иванов, А.А. Фещенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 82–89. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.10
7. Хиёу, В.Д. Методика и алгоритм экспресс оценки состояния сложных технических систем. Конструктивный подход / В.Д. Хиёу, Р.А. Файзрахманов // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172

8. Грабчак, Е.П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики / Е.П. Грабчак // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 4. – С. 268–274.

9. Ресурсное обеспечение адаптивности железобетона / В.Л. Чернявский, В.В. Галат, Ю.Б. Гиль [и др.] // Вісник Доньбаскої національної академії будівництва і архітектури. – 2010. – № 5 (85). – С. 346–352.

10. Тимофеев, А.В. Идентификация стадии деградации оборудования в системах сервисного обслуживания превентивного типа / А.В. Тимофеев, В.М. Денисов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – № (6). – С. 1095–1104.

11. Matusugu, M. Subject Independent Facial Expression Recognition with Robust Face Detection using a Convolutional Neural Network / M. Matusugu, K. Mitari, Y. Kaneda // Neural Networks. – 2003. – Vol. 16, № 5. – P. 555–559.

12. Басманов, В.Г. Выбор периодичности оценки технического состояния воздушных линий 6–10 кВ по результатам статистических исследований их надежности / В.Г. Басманов, В.М. Холманских // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 4 (48). – С. 23–34.

13. Периодичность контроля технического состояния мобильной сельскохозяйственной техники / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 81 (07). – С. 1–11.

14. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П.В. Чумаков, А.В. Мартынов, А.В. Коломейченко [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 426–447. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.426-447

15. Аналитико-статистический метод оценки состояния и прогнозирования рисков сложных технических систем / Л.И. Ковтун, О.В. Крюков, А.В. Саушев [и др.] // Надежность и качество: тр. междунар. симпоз. – 2020. – Т. 1. – С. 264–269.

16. Байдюк, М.А. Оценка технического состояния и надежности электрических машин / М.А. Байдюк, Г.В. Комарова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 3. – С. 78–84.

17. Семенов, С.С. Основные положения системного анализа при оценке технического уровня сложных систем с применением экспер-

ного метода / С.С. Семенов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 45–53.

18. Методика оценки технического состояния эскалатора / М.В. Харлов, В.А. Попов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 4. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf>

19. Харлов, М.В. Определение некоторых параметров модели оценки технического состояния эскалатора / М.В. Харлов, В.А. Попов, В.А. Уралов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 5. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/39TVN517.pdf>

20. Интегрированный логистический менеджмент на основе многокритериальной оценки технического состояния машин / Г.Г. Ядрошникова, О.А. Шаламова, Е.В. Самойлова [и др.] // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 248–256. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-248-256

21. Микрюков, П.В. Эффективная методика описания детерминированных моделей объектов / П.В. Микрюков // Программные продукты и системы. – 2007. – № 4. – С. 76–79.

22. Хальясмаа, А.И. Разработка системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейронечеткого логического вывода: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / А.И. Хальясмаа. – Екатеринбург, 2015. – 147 с.

23. Evaluating the importance of nodes in complex networks / J. Liu, Q. Xiong, W. Shi, X. Shi, K. Wang // Physica A. – 2016. – № 452. – P. 209–219.

24. О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей: Постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

25. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: Приказ Министерства энергетики РФ № 676 от 26.07.2017 // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

26. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий // Авиадвигатель. – 2006. – 1024 с.

27. Turbofan engine degradation simulation data set [Электронный ресурс]. – URL: <https://c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/> (дата обращения: 16.12.2022).

References

1. Shurinova D.A. Murygin A.V. Analiz tselesoobraznosti primeneniia neironnykh setei dlia opredeleniia godnosti kholodil'nogo pribora na stadii priemo-sdatochnykh ispytaniy i avtomaticheskoi klassifikatsii prichiny braka [Analysis of the feasibility of using neural networks to determine the suitability of a refrigeration appliance at the stage of acceptance tests and automatic classification of the cause of defects]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 44, pp. 173–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.09

2. Gavriiliuk E.A., Mantserov S.A. Razrabotka strategii obsluzhivaniia i remonta oborudovaniia gazotransportnogo predpriiatiia na osnove indeksa tekhnicheskogo sostoianiia [Development of a strategy for maintenance and repair of gas transportation enterprise equipment based on the technical condition index]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*, 2017, no. 3 (118), pp. 121-126.

3. Levin V.M., Guzhov N.P., Boiarova D.A. K voprosu ob effektivnosti upravleniia remontami elektrooborudovaniia neftedobychi so strategiei po tekhnicheskomu sostoianiiu [On the issue of the effectiveness of managing repairs of electrical equipment in oil production with a strategy for technical condition]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 39-51. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51

4. Khuntia S., Rueda Torres J.L., Bouwman S., van der Meijden M. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016, no. 26 (10), pp. 2123-2133. DOI: 10.1002/etep.2193

5. Gerike B.L., Abramov I.L., Gerike P.B. Strategiiia tekhnicheskogo obsluzhivaniia gornykh mashin po fakticheskomu sostoianiiu na osnove metodov vibrodiagnostiki i nerazrushaiushchego kontroliia [Strategy for the maintenance of mining machines based on actual condition based on vibration diagnostics and non-destructive testing methods]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 1 (65), pp. 11-14.

6. Ivanov V.A., Feshchenko A.A. Osobennosti podkhodov k tekhnicheskomu obsluzhivaniiu i remontu oborudovaniia v nepreryvnom proizvodstve [Features of approaches to equipment maintenance and repair in continuous production]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 82-89. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.10

7. Khieu V.D., Faizrakhmanov R.A. Metodika i algoritm ekspress otsenki sostoianiia slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Konstruktivnyi podkhod [Methodology and algorithm for express assessment of the state of complex technical systems. Constructive approach]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2024, no. 4, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172

8. Grabchak E.P. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia energeticheskogo oborudovaniia v usloviakh tsifrovoi ekonomiki [Assessment of the technical condition of power equipment in the digital economy]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2017, no. 4, pp. 268-274.

9. Cherniavskii V.L., Galat V.V., Gil' Iu.B. et al. Resursnoe obespechenie adaptivnosti zhelezobetona [Resource support for reinforced concrete adaptability]. *Visnik Don'basskoi natsional'noi akademii budivnitstva i arkhitekturi*, 2010, no. 5 (85), pp. 346-352.

10. Timofeev A.V., Denisov V.M. Identifikatsiia stadii degradatsii oborudovaniia v sistemakh servisnogo obsluzhivaniia preventivnogo tipa [Identification of the stage of equipment degradation in preventive maintenance systems]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2019, no. (6), pp. 1095-1104.

11. Matusugu M., Mitari K., Kaneda Y. Subject Independent Facial Expression Recognition with Robust Face Detection using a Convolutional Neural Network. *Neural Networks*, 2003, vol. 16, no. 5, pp. 555-559.

12. Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Vybor periodichnosti otsenki tekhnicheskogo sostoianiia vozdushnykh linii 6-10 kV po rezul'tatam statisticheskikh issledovaniy ikh nadezhnosti [Choosing the frequency of assessing the technical condition of 6-10 kV overhead lines based on the results of statistical studies of their reliability]. *Problemy regional'noi energetiki*, 2020, no. 4 (48), pp. 23-34.

13. Byshov N.V., Borychev S.N., Kokorev G.D. et al. Periodichnost' kontrolya tekhnicheskogo sostoianiia mobil'noi sel'skokhoziaistvennoi tekhniki [Frequency of monitoring the technical condition of mobile agricul-

tural machinery]. *Nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 81 (07), pp. 1-11.

14. Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeichenko A.V. et al. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia kruglykh shesterennykh gidronasosov navesnykh gidrosistem traktorov [Assessment of the technical condition of round gear hydraulic pumps of tractor mounted hydraulic systems]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*, 2020, vol. 30, no. 3, pp. 426-447. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.426-447

15. Kovtun L.I., Kriukov O.V., Saushev A.V. et al. Analitiko-statisticheskii metod otsenki sostoianiia i prognozirovaniia riskov slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Analytical and statistical method for assessing the condition and predicting risks of complex technical systems]. *Nadezhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma*, 2020, vol. 1, pp. 264-269.

16. Baidiuk M.A., Komarova G.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia i nadezhnosti elektricheskikh mashin [Assessment of the technical condition and reliability of electrical machines]. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2019, no. 3, pp. 78-84.

17. Semenov S.S. Osnovnye polozheniia sistemnogo analiza pri otsenke tekhnicheskogo urovnia slozhnykh sistem s primeneniem ekspertnogo metoda [Basic principles of system analysis when assessing the technical level of complex systems using the expert method]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2013, no. 4, pp. 45-53.

18. Kharlov M.V., Popov V.A. Metodika otsenki tekhnicheskogo sostoianiia eskalatora [Methodology for assessing the technical condition of an escalator]. *"Naukovedenie" internet-zhurnal*, 2017, vol. 9, no. 4, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf>

19. Kharlov M.V., Popov V.A., Uralov V.A. Opredelenie nekotorykh parametrov modeli otsenki tekhnicheskogo sostoianiia eskalatora [Determination of some parameters of the model for assessing the technical condition of an escalator]. *"Naukovedenie" internet-zhurnal*, 2017, vol. 9, no. 5, available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/39TVN517.pdf>

20. Iadroshnikova G.G., Shalamova O.A., SamoiloVA E.V. et al. Integrirovannyi logisticheskii menedzhment na osnove mnogokriterial'noi otsenki tekhnicheskogo sostoianiia mashin [Integrated logistics management based on multi-criteria assessment of the technical condition of machines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 10, pp. 248-256. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-248-256

21. Mikriukov P.V. Effektivnaia metodika opisaniia determinirovannykh modelei ob"ektov [An effective technique for describing deterministic object models]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2007, no. 4, pp. 76-79.

22. Khal'iasmaa A.I. Razrabotka sistemy otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia elektrosetevogo oborudovaniia na osnove neironechetkogo logicheskogo vyvoda [Development of a system for assessing the technical condition of electrical grid equipment based on neuro-fuzzy logical inference]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2015, 147 p.

23. Liu J., Xiong Q., Shi W., Shi X., Wang K. Evaluating the importance of nodes in complex networks. *Physica A*, 2016, no. 452, pp. 209-219.

24. О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показатели физического износа и энергетической эффективности объектов электроетевого хозяйства, и об осущчествлении мониторинга таких показателей: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19 dekabria 2016 g. № 1401 [On a comprehensive determination of indicators of the technical and economic condition of electric power facilities, including indicators of physical wear and tear and energy efficiency of electric grid facilities, and on monitoring such indicators: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1401 dated December 19, 2016]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

25. Ob utverzhdenii metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniia i linii elektroperedachi elektricheskikh stantsii i elektricheskikh setei: Prikaz Ministerstva energetiki RF № 676 ot 26.07.2017 [On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power transmission lines of power stations and electrical networks: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 676 dated 07/26/2017]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

26. Inozemtsev A.A., Sandratskii V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. *Aviadvigatel'*, 2006, 1024 p.

27. Turbofan engine degradation simulation data set, available at: <https://c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/> (accessed 16 December 2022).

Сведения об авторах

Бу Динь Хиёу (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического

университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vudinhhie20051987@gmail.com).

Файзрахманов Рустам Абубакирович (Пермь, Российская Федерация) – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и автоматизированные системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Fayzrakhmanov@gmail.com).

About the authors

Hieu Wu Din (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Information Technologies and Automated Systems Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: vudinhhie20051987@gmail.com).

Rustam A. Fayzrakhmanov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Information Technologies and Automated Systems Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Fayzrakhmanov@gmail.com).

Поступила: 24.05.2024. Одобрена: 13.06.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ву Динь, Хиеу. Модифицированная модель индекса технического состояния системы. Алгоритм расчета и анализ применимости / Хиеу Ву Динь, Р.А. Файзрахманов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 195–215. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.10

Please cite this article in English as:

Wu Din Hieu, Fayzrakhmanov R.A. Modified model of the system technical condition index. Algorithm for calculation and applicability analysis. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 195-215. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.10