

Методика и алгоритм экспресс оценки состояния сложных технических систем. Конструктивный подход.

В. Д. Хиеу, Р. А. Файзрахманов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Аннотация: Оценка технического состояния (далее ТС) технических систем является обязательным условием современной стратегии их эксплуатации. Исследование новых методов и алгоритмов, обеспечивающих получение экспресс-оценки состояния технических устройств и уменьшение субъективной составляющей в этих оценках, является задачей актуальной и востребованной.

В работе представлен конструктивный подход к оценке показателей ТС сложных технических систем на основе модифицированного метода анализа иерархий и индекса ТС (далее ИТС) оборудования, который определяется на основе весов и ИТС основных узлов рассматриваемого оборудования. ИТС основных узлов рассчитывается, исходя из сравнительных характеристик параметров работы оборудования в процессе его эксплуатации, а веса узлов определяются на основе методов матрицы парных сравнений (метод Саати) и степени важности линии (метод DIL - Degree Importance Line).

Проверка методики и алгоритмов в данном исследовании выполнена на основе статистических данных турбореактивного двухконтурного двигателя (далее ТРДД) NASA, опубликованных в 2008 году.

Ключевые слова: техническое состояние, индекс технического состояния, сложная техническая система, техническое обслуживание и ремонт, метод анализа иерархий, метод DIL, конструктивный метод оценки технического состояния, экспресс-оценки технического состояния.

I. Введение

В настоящее время на промышленных предприятиях используются различные стратегии технического обслуживания и ремонта (далее ТОиР) оборудования: эксплуатация до отказа, планово-предупредительный ТОиР, ТОиР по фактическому состоянию, проактивное ТОиР [1]. Первые две стратегии не основаны на фактическом ТС оборудования, их недостаток проиллюстрирован на рис. 1.

Пусть в нормальных условиях эксплуатации оборудования деградация технического состояния (далее ТС) происходит по кривой 1. Допустимые величины времени эксплуатации (Т) и уровня надежности (S) составят соответственно Td1 и Sd1. При экстремальных условиях эксплуатации

оборудования деградация оборудования будет происходить по кривой 2. Допустимые величины времени эксплуатации и уровня надежности составят соответственно T_{d2} и S_{d1} . Однако, при неправильном расчете времени эксплуатации без учета экстремальных условий уровень надежности может опуститься до величины S_{d2} , что является недопустимым, так как может привести к разрушению оборудования.

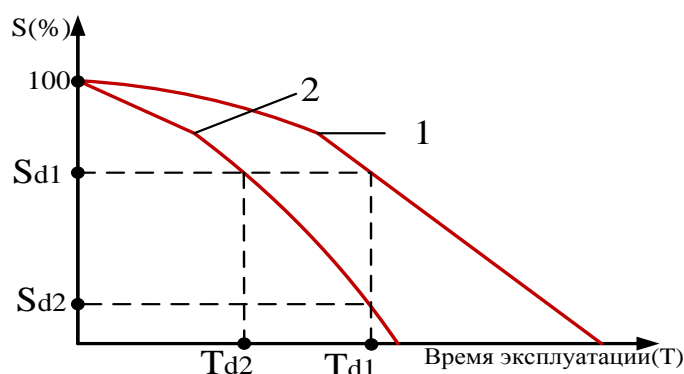


Рис. 1. - График деградации ТС оборудования при различных условиях эксплуатации

Сбойные ситуации связаны с большими потерями времени и средств на восстановление ТС оборудования, возможно, и рабочей силы.

Развитие измерительной техники, теории надежности, исследования в области эксплуатационных свойств оборудования в начале 80-х годов XX века способствовали реализации стратегии ТОиР по ТС [2]. Поэтому в современных условиях всё больше находит применение стратегия ТОиР по фактическому состоянию оборудования. Стратегия ТОиР по ТС направлена на устранение недостатков исторически предшествовавшей ей стратегии планово-предупредительных ремонтов, а именно - на снижение количества необоснованных ремонтных работ с целью максимального использования ресурса оборудования. Однако регламентация ТОиР обуславливается случайным фактором – фактическим ТС оборудования, что уменьшает эффективность долгосрочного планирования работ по техническому обслуживанию ресурсов [3].

В последнее время всё большую популярность приобретает проактивная стратегия ТОиР. Анализ, проведенный в работе [4], позволяет определить проактивную стратегию ТОиР как наиболее эффективную и целесообразную для внедрения в современных экономических условиях.

Сущность проактивной стратегии ТОиР оборудования заключается в выполнении необходимых ремонтных воздействий, направленных на снижение скорости развития или устранение неисправностей, которые выявлены на основе сведений о фактическом ТС оборудования.

Научно обоснованные решения будут способствовать повышению эффективности эксплуатации оборудования. В последние годы для оценки ТС оборудования широко применяется индекса ТС (далее ИТС) оборудования. Согласно приказу Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 "Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей" (с изменениями на 17 марта 2020 года), а также постановлению Правительства Российской Федерации от 30.05.2023 г. № 878 "О внесении изменений в методику комплексного определения показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе, показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства" утверждено понятие "индекс технического состояния" (ИТС) как показатель технического состояния оборудования. Это показатель, определяющий обобщенную оценку уровня надежности технического состояния оборудования, измеряемый в процентах.

Уменьшение субъективного фактора при расчетах ИТС, разработка моделей и алгоритмов для экспресс - оценки ИТС являются задачами актуальными и своевременными.

Для сложных технических систем существуют различные подходы к

оценке ТС [5]: подход на основе детерминированных моделей, статистико-вероятностный подход, подход на основе экспертных знаний, комбинированный подход.

В работе [6] предложен подход к оценке ТС железобетонной металлоконструкции, состояние которой зависит от физических и химических свойств бетона, изменяющихся с течением времени в процессе эксплуатации. В данной работе использован детерминированный модельный подход, недостатком которого является необходимость построения уравнений, описывающих зависимость физико-химических свойств от времени эксплуатации, а также условий воздействия окружающей среды. Зачастую это очень сложно сделать, поскольку требуется очень глубокое понимание оцениваемого объекта. Поэтому данный подход нельзя предложить для экспресс - оценки ИТС.

В работах [7] представлен метод оценки ТС оборудования путем измерения его физического износа. В публикации [8] предложены методы машинного и глубокого обучения для оценки ТС рассматриваемого объекта. Эти подходы основаны на использовании больших объемов статистических данных и могут содержать шумы, требующие дополнительных исследований.

В работах [9] используется метод анализа иерархии (далее МАИ) на основе экспертных данных, что, соответственно, предполагает сильную зависимость от субъективного мнения экспертов.

Дальнейшие исследования, направленные на уменьшение влияния субъективных факторов, связаны с использованием комбинированных подходов к оценке ТС оборудования, включающих детерминированные модели, статистические методы уточнения параметров [10], а также современных методов обработки данных таких, как нейронные сети, использование мягких шкал для измерений [11].

В данной работе предложен авторский подход, названный

конструктивным, методика и алгоритм экспресс оценки ИТС сложных технических систем.

Предложенный ИТС оценивается на основе функциональной структурной модели сложной технической системы, включающей систему взаимосвязанных основных функциональных узлов, представленных в виде графа; модифицированного метода анализа иерархий [12], в котором сравнительный анализ степени важности функциональных узлов выполнен на основе метода анализа важности связей на графической модели технической системы (метод DIL - Degree Importance Line) [13].

Предложенная методика будет тестироваться на статистических данных, предоставленных NASA, по результатам испытаний турбореактивного двухконтурного двигателя (далее ТРДД) в 2008 году.

II. Методика и алгоритм экспресс оценки ИТС технического объекта

Величина ИТС оборудования (I), а также узлов ($I_i, i=1..n$) рассматриваемого оборудования может находиться в интервале значений от 0 до 100 баллов (можно рассматривать как проценты). Здесь 100 баллов - это наилучший уровень ТС, когда начинает вводиться в эксплуатацию вполне исправное оборудование, а 0 баллов - оценка наихудшего ТС, когда оборудование нельзя эксплуатировать дальше.

Веса основных функциональных узлов ($C_i, i=1..n$) рассматриваемого оборудования, определяющие ценность этих узлов в процессе эксплуатации с точки зрения значимости в оборудовании, а также веса параметров ($w_{i,j}, i=1..n; j=1..m_i$, где $w_{i,j}$ - величина веса j -го параметра i -го узла; m_i - количество параметров для i -го узла) будут иметь значения от 0 до 1. Сумма весов основных функциональных узлов технической системы равна 1. Сумма весов диагностических параметров, характеризующих работоспособность любого основного узла, равна 1.

Методика количественной оценки ТС включает следующие шаги:

Шаг №1. Анализ сложной технической системы и построение функциональной структурной модели в виде графа.

Выделяем основные функциональные узлы технической системы. Выявляем связи между ними. Представим структуру сложного оборудования состоящей из основных функциональных узлов и связей между ними в виде графа $G(V, E)$, где $V = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество вершин (функциональных узлов); $E = \{e_{i,j}\}$ — множество ребер, соединяющих вершины i и j . Пример технической системы показан на рис. 2.

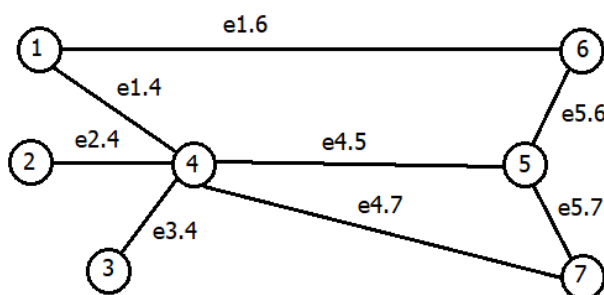


Рис. 2. - Функциональная структурная модель сложной технической системы

Шаг №2. Расчет ИТС-параметров технической системы.

Выбор контролируемых параметров, влияющих на ТС основных функциональных узлов рассматриваемого оборудования, выявление их нормативных значений и расчет ИТС-параметров.

ИТС параметров определяется по формуле (1а) или (1б):

$$I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,j\min}) * 100\%}{x_{i,j\max} - x_{i,j\min}} \quad (1a), \quad I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,j\max}) * 100\%}{x_{i,j\min} - x_{i,j\max}}, \quad (1b)$$

где: $I_{i,j}$ - ИТС j -го параметра i -го узла; где $i=1..n$, $j=1..m_i$; n - количество основных функциональных узлов рассматриваемого оборудования; m_i - количество параметров для i -го узла; $x_{i,jT}$ - текущее значение j -го параметра i -го узла, определенное из системы мониторинга в момент времени оценки ТС; $x_{i,j\max}$, $x_{i,j\min}$ - максимальное и минимальное значения j -го параметра i -го узла, определенные по паспортным данным или данным испытаний.

Формула (1а) применяется к параметрам, которые постепенно уменьшаются с течением времени в процессе работы устройства. В случае постепенного увеличения параметров в течение рабочего времени применяется формула (1б).

Шаг №3. Расчет весов контролируемых параметров основных функциональных узлов.

Изменение ТС основных функциональных узлов ведет к изменению значений их контролируемых параметров. Большее изменение определенных параметров будет в первую очередь определять изменение ТС функционального узла, или можно сказать, что этот параметр имеет больший вес при определении ТС функционального узлов.

Традиционно веса параметров узлов $w_{i,j}$ ($i=1..n; j=1..m_i$) определяются на основе знаний экспертов и их опыта в данной предметной области [9].

Но в условиях, когда имеются данные системы мониторинга о рабочих параметрах, веса можно определить статистическими методами.

В данной работе предлагается определить веса $w_{i,j}$ j -го параметра ($j=1..m_i$) i -го узла ($i=1..n$) по формуле (2):

$$w_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{\sum_{j=1}^{m_i} v_{i,j}}, \quad (2)$$

где: $v_{i,j} = \frac{s_{i,j}}{\bar{x}_{i,j}}$ - коэффициенты вариации; $s_{i,j} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{ij}} (x_{i,j,k} - \bar{x}_{i,j})^2}{N_{ij} - 1}}$ - стандартное отклонение j -го параметра ($j=1..m_i$) i -го узла ($i=1..n$); рассчитывающееся на основе набора данных о параметре в процессе эксплуатации; $\bar{x}_{i,j}$ - 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 ($i=1..n$).

При использовании этого метода веса не будут фиксированными, а

будут корректироваться в процессе эксплуатации в соответствии с состоянием объекта в процессе эксплуатации. При этом снимается ограничение экспертного метода, заключающееся в том, что веса всегда фиксируются в процессе эксплуатации, что может привести к большим ошибкам в оценке всего процесса.

Шаг №4. Расчет весов основных функциональных узлов C_i , $i=1..n$, рассматриваемого оборудования.

Определение весов основных функциональных узлов оборудования в данной работе основано на методе матрицы попарных сравнений A (n , n) (метод Саати) [12]. Создается сравнительная таблица между основными функциональными узлами. Элемент $a_{i,j}$ характеризует важность узла i по сравнению с узлом j , причем $a_{j,i} = \frac{1}{a_{i,j}}$, $a_{i,i} = 1$.

Для определения коэффициентов $a_{i,j}$, в классических методах Саати, как правило, используют экспертные методы, причем коэффициенты $a_{i,j}$ могут быть как нечеткими, так и четкими. В зависимости от уровня влияния между узлами по оценке экспертов, коэффициенты $a_{i,j}$ получают соответствующие значения по шкале Саати [9, 14, 15]. Основное влияние на точность метода Саати оказывают субъективные суждения экспертов о значении коэффициента $a_{i,j}$ в матрице парного сравнения. Причина этого в том, что при оценке эксперты считают критерии, или объекты, независимыми (независящими друг от друга). Однако в действительности критерии или объекты могут находиться в сложных отношениях с взаимными взаимодействиями. В своей работе Саати также признал, что для принятия серьезных решений необходимо учитывать эти взаимосвязи, и тогда метод иерархического анализа будет более объективным.

В данной работе техническая система рассматривается в виде взаимосвязанных основных функциональных узлов и представляется в виде

графа. Для формирования матрицы попарных сравнений узлов A (n, n) выполняется анализ важности связей между узлами на графической модели технической системы методом DIL (метод DIL - Degree Importance Line - степень важности линии) [11], метод предложен автором Liu и его соавторами как метод топологического анализ графа.

По методу DIL, на основе графической модели системы коэффициент важности узлов определяется по формуле (3):

$$L_i = k_i + \sum_{j \in C} W_{ij}, \quad (3)$$

где: L_i - коэффициент важности узла i ; k_i - степень узла i , равна количеству линий, соединенных с узлом i ; W_{ij} - оценка вклада узла i в важность линии $e_{i,j}$; C - множество вершин, связанных с вершиной i .

Величина W_{ij} определяется по формуле (4):

$$W_{ij} = I_{e_{i,j}} * \frac{k_i - 1}{k_i + k_j - 2}, \quad (4)$$

где: k_i, k_j - степени узлов i, j ; $I_{e_{i,j}}$ - степень важности линии связи $e_{i,j}$ в системе.

Степень важности линии связи $e_{i,j}$ определяется по формуле (5):

$$I_{e_{i,j}} = \frac{U_{ij}}{\lambda_{ij}}, \quad (5)$$

где: $U_{ij} = (k_i - p - 1) * (k_j - p - 1)$ отражает связность линии $e_{i,j}$; p - количество треугольников, из которых линия $e_{i,j}$ является ребром; λ_{ij} - индекс вариации линии $e_{i,j}$, определяемый как $\lambda_{ij} = \frac{p}{2} + 1$.

Коэффициенты сравнительной важности узлов $a_{i,j}$ рассчитываются по формуле (6):

$$a_{i,j} = \frac{L_i}{L_j}, \quad (6)$$

причем, $a_{i,j} = 1$, если $i = j$.

Элементы каждого столбца матрицы A (n, n) будут разделены на сумму элементов этого столбца. Вычисляя среднее значение каждой строки, мы получаем вес каждого соответствующего узла по формуле (7):

$$C_i = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^n a_{i,j}} . \quad (7)$$

Шаг №5. Расчет ИТС основных функциональных узлов и оборудования в целом.

- ИТС i -го узла (I_i) рассматриваемой системы определяется по формуле (8):

$$I_i = \sum_{j=1}^{m_i} (w_{i,j} * I_{i,j}) , \quad (8)$$

где: m_i - количество контролируемых параметров ТС i -го узла; $I_{i,j}$ - ИТС j -го параметра ($j=1..m_i$) i -го узла ($i=1..n$); и определяется по формуле (1а) или (1б); $w_{i,j}$ - вес j -го параметра ($j=1..m_i$) i -го узла ($i=1..n$); и определяется по формуле (2). Величина ИТС $I_{i,j}$ характеризует степень готовности узла i по параметру j к использованию в данный момент времени, измеряется в процентах.

- ИТС технической системы (оборудования) определяется по формуле (9):

$$I = \sum_{i=1}^n (C_i * I_i) , \quad (9)$$

где: n - количество основных функциональных узлов оборудования; C_i - вес i -го узла в технической системе, определяется по формуле (7); I_i - ИТС i -го узла и определяется по формуле (8).

Величина ИТС (I) характеризует степень готовности технической системы (оборудования) в целом в данный момент времени, измеряется в процентах.

III. Расчет ИТС на основе экспериментальных данных

Расчет ИТС выполнен для ТРДД, представляющего собой сложную техническую систему. ТРДД состоит из основных функциональных узлов [16]: вентилятора (далее ВЕН), компрессора низкого давления (далее КНД),

компрессора высокого давления (далее КВД), турбины высокого давления (далее ТВД), турбины низкого давления (далее ТНД). Граф, описывающий взаимосвязь основных узлов, показан на рис. 3. В качестве основных функциональных узлов выбраны устройства, соответствующие вершинам 1 ÷ 5 графа, представленного на рис. 3. К контролируемым параметрам, характеризующим возможность определения ТС основных функциональных узлов ТРДД, относятся: физическая скорость вентилятора, суммарная температура на выходе компрессора низкого давления, суммарная температура на выходе компрессора высокого давления, суммарное давление на выходе компрессора высокого давления, статическое давление на выходе компрессора высокого давления, стравливания охлаждающей жидкости турбины высокого давления, суммарная температура на выходе турбины низкого давления, стравливания охлаждающей жидкости турбины низкого давления.

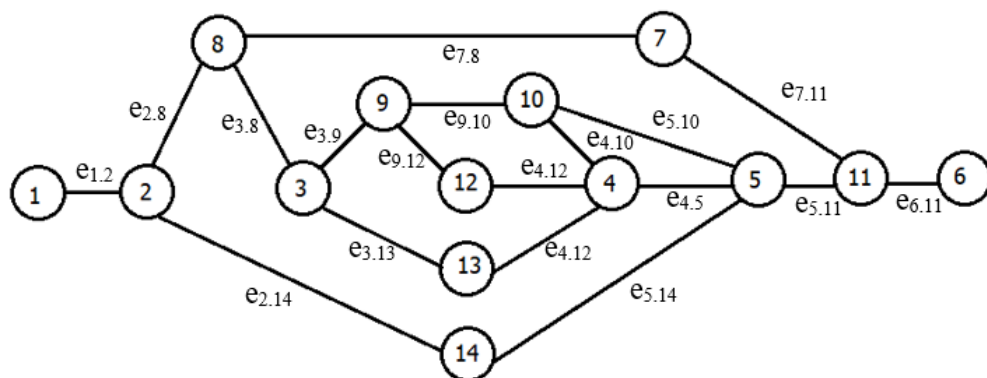


Рис. 3. - Функциональная структурная схема ТРДД в виде графа.

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.

Статистические данные контролируемых параметров для оценки ТС взяты из набора данных FD001, предоставленный NASA [17].

Результаты расчета ИТС (I) первых 3-х двигателей (формула 9) по набору данных для разных моментов времени (циклов) $T=50, 100, 150$ представлены в табл. № 1 и графике на рис. 4.

По данным табл. № 1 и графика на рис. 4 видно, что ИТС всех 3 двигателей имеет тенденцию к снижению с течением времени. Двигатель 2 имеет самую медленную скорость ухудшения ИТС среди 3-х двигателей.

Таблица № 1

Результаты расчета ИТС (в %) первых 3-х двигателей для $T=50, 100, 150$

T (цикл)	Двигатель 1	Двигатель 2	Двигатель 3
50	92.4	92.9	94.3
100	83.4	89.3	86.1
150	53.4	82.6	46.5

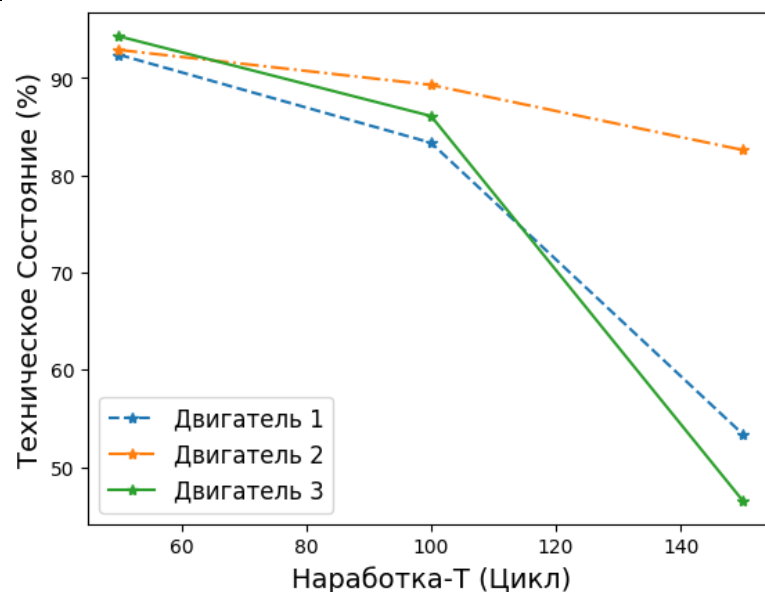


Рис. 4. - Результаты расчета ИТС 3-х двигателей (формула 9) по набору данных для разных моментов времени (циклов) $T=50, 100, 150$

Согласно информации в наборе данных, предоставленном NASA, двигатель 1 работал до момента времени (циклов) $T = 192$, затем вышел из строя, двигатель 2 работал до момента времени $T = 287$, затем вышел из строя, а двигатель 3 работал до момента времени $T = 179$, затем вышел из строя. Это означает, что жизненный цикл двигателя 3 меньше жизненного цикла двигателя 1 и меньше жизненного цикла двигателя 2.

Исходя из приведенных обоснований показано, что предложенный метод эффективен при экспресс-оценке ИТС и может быть применен.

IV. Заключение

В данной статье предложены методика и алгоритм экспресс оценки ТС сложных технических систем. Это конструктивный подход, сочетающий иерархический анализ с конструктивными и статистическими методами. По предлагаемой методике ИТС определяется на основе весов и ИТС основных узлов рассматриваемого оборудования. ИТС основных узлов рассчитывается, исходя из сравнительных характеристик параметров работы оборудования в процессе его эксплуатации, а веса узлов определяются на основе методов матрицы парных сравнений (метод Саати) и степени важности линий связей (метод DIL - Degree Importance Line). Это позволяет снизить субъективную составляющую в оценках.

Результаты расчета ИТС, полученные на основе предложенной методики, показывают, что предложена рабочая методика, позволяющая определить оценку ИТС технической системы без привлечения экспертов и их субъективных оценок. Полученные оценки характеризуются более "осторожными" значениями, что будет обеспечивать большую надежность в процессе мониторинга работоспособности технической системы.

Литература

1. Ажмухамедов И. М., Гостюнин Ю. А. Выбор стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования сетей связи на предприятиях нефтегазового комплекса // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4202.

2. Ширман А. Р., Соловьёв А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М.: Москва, 1996. 276 с.

3. Сидоров А. В., Сидоров В. А. Руководство по управлению отказами оборудования. Донецк: Издатель Александр Сидоров, 2023. 528 с.

4. Бобровицкий В. И., Сидоров А. В. Совершенствование системы ТОиР оборудования в условиях централизации ремонтной службы предприятия // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. Донецк:

ДонНТУ. 2011. №1 (24). С. 23-28.

5. Спесивцев А. В. Формализация и использование явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. Санкт-Петербург, 2019. 357 с.

6. Чернявский В. Л., Галат В. В., Гиль Ю. Б., Спирин Ю. Б. Ресурсное обеспечение адаптивности железобетона // Вісник Доньбасської національної академії будівництва і архітектури. 2010. №5 (85). С. 346-352.

7. Осипов С. Н., Поздняков Д. А. Об оценке физического износа элементов технических устройств // Наука и техника. 2015. №2. С. 23-30.

8. Клячкин В. Н., Жуков Д. А. Прогнозирование состояния технического объекта с применением методов машинного обучения // Программные продукты и системы / Software & Systems. 2019. Т.32. №2. С. 244-250.

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

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

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

12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

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

14. Chang D. Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. 1996. V. 95. №3. pp. 649-655.

15. Мощенко И. Н., Пирогов Е. В. К выбору оценочной шкалы в методе

анализа иерархий // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4725.

16. Иноземцев А. А., Сандрацкий А. А. Газотурбинные двигатели. Изд-во ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1024 с.

17. Turbofan engine degradation simulation data set URL: c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/ (дата обращения: 16.12.2022).

References

1. Azhmuamedov I. M., Gostjunin Ju. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4202.

2. Shirman A. R., Solov'jov A. B. Prakticheskaja vibrodiagnostika i monitoring sostojanija mehanicheskogo oborudovanija [Practical vibration diagnostics and condition monitoring of mechanical equipment]. Moscow: Moskva, 1996. 276 p.

3. Sidorov A. V., Sidorov V. A. Rukovodstvo po upravleniju otkazami oborudovanija [Equipment Failure Management Guide]. Donetsk: Publisher Alexander Sidorov, 2023. 528 p.

4. Bobrovickij V. I., Sidorov A. V. Vibracija mashin: izmerenie, snizhenie, zashhita. Doneck: DonNTU. 2011. №1 (24). pp. 23-28.

5. Spesivcev, A. V. Formalizacija i ispol'zovanie javnyh i nejavnyh jekspertnyh znaniy dlja ocenivanija sostojanija slozhnyh ob#ektov [Formalization and use of explicit and implicit expert knowledge to assess the state of complex objects]: dis. ... dokt. tehn. nauk : 05.13.01. Sankt-Peterburg, 2019. 357 p.

6. Chernjavskij V. L., Galat V. V., Gil' Ju. B., Spirin Ju. A. Visnik Don'basskoi nacional'noi akademii budivnictva i arhitekturi. 2010. №5 (85). pp. 346-352.

7. Osipov S. N., pozdnjakov D. A. Nauka i tehnika. 2015. №2. pp. 23-30.

8. Kljachkin V. N., Zhukov D. A. Programmnye produkty i sistemy / Software & Systems. 2019. T.32. №2. pp. 244-250.

9. Grabchak E. P. Nadezhnost' i bezopasnost' jenergitiki. 2017. №4. pp. 268-274.

10. Mikrjukov P. V. Programmnye produkty i sistemy. 2007. №4. pp.76-79.

11. Hal'jasmaa A. I. Razrabotka sistemy ocenki tehničeskogo sostojanija jelektrosetevogo oborudovanija na osnove nejronechetkogo logičeskogo vyvoda [Development of a system for assessing the technical condition of electrical grid equipment based on neuro-fuzzy logical inference]: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.14.02. Ekaterinburg, 2015. 147p.
12. Saati T. Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij [Making decisions. Hierarchy Analysis Method]. Moskva: Radio i svjaz', 1993. 278 p.
13. Liu J., Xiong Q., Shi W., Shi X., Wang K. Physica A. 2016. №452. pp. 209-219.
14. Chang D. Y. European Journal of Operational Research. 1996. V. 95. №3. pp. 649-655.
15. Moshhenko I. N., Pirogov E. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4725.
16. Inozemcev A. A., Sandrackij A. A. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Izd-vo OAO «Aviadvigatel'», 2006. 1024 p.
17. Turbofan engine degradation simulation data set. URL: c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/ (date accessed: 16.12.2022).

Дата поступления: 5.03.2024

Дата публикации: 19.04.2024