

Методика определения порогового значения модифицированного индекса технического состояния оборудования на основе вероятности безотказной работы

В. Д. Хиеу

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Аннотация: Оценка технического состояния оборудования является важной задачей обеспечения стратегии эксплуатации и планирования ремонтных работ на предприятии. Одним из подходов к оценке состояния оборудования является использование известного показателя «индекс технического состояния», методика расчета которого утверждена Минэнерго РФ. В этой же методике предложена шкала оценки уровня технического состояния оборудования. Однако, вопрос о граничном или пороговом значении этого показателя, по которому можно судить о непригодности оборудования к дальнейшей эксплуатации, остается открытым.

В работе предложена методика определения порогового значения модифицированного индекса технического состояния на основе допустимой вероятности безотказной работы оборудования с использованием статистических методов.

Новизна работы заключается в предложении методики определения порогового значения модифицированного индекса технического состояния, разработанного автором, для оценки которого используются объективные данные, в отличие от субъективных оценок экспертов в существующих методиках. Проверка предлагаемой методики выполнялась на наборе статистических данных по деградации турбореактивных двухконтурных двигателей за 2008 год, предоставленном Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration - NASA).

Ключевые слова: индекс технического состояния, модифицированный индекс технического состояния, пороговое значение, вероятность безотказной работы оборудования, сложный технический объект.

Введение

В настоящее время широко используется метод эксплуатации оборудования на промышленных предприятиях, основанный на контроле его технического состояния [1 - 3]. Практика доказала, что это способствует обеспечению надежности, безопасности и минимизации издержек бизнеса, тем самым повышая ее конкурентоспособность [4 - 6].

Для оценки технического состояния оборудования в России используется методика на основе показателя «индекс технического состояния», утвержденная приказом Министерства энергетики РФ №676 от

26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». Индекс технического состояния (далее ИТС) оборудования имеет значение, изменяющееся от 100 до 0 (в процентах), где 100 - наилучшее значение индекса технического состояния оборудования на момент ввода его в эксплуатацию, а 0 - наихудшее значение индекса технического состояния оборудования. Авторами в работах [7, 8] предложен модифицированный индекс технического состояния сложных объектов, основанный на использовании объективных данных вместо субъективных оценок экспертов.

Согласно [7, 8] модифицированный ИТС сложного объекта (I), основных функциональных узлов и контролируемых параметров рассчитывают по формулам (1), (2) и (3а или 3б), соответственно.

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

где: n - количество основных функциональных узлов в объекте; C_i - вес i -го основного функционального узла; I_i - ИТС i -го основного функционального узла.

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

где: m_i - количество контролируемых параметров технического состояния i -го узла; $I_{i,j}$ - ИТС j -го параметра ($j=1..m_i$) i -го узла ($i=1..n$); $w_{i,j}$ - вес j -го параметра i -го узла.

$$I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,jmin}) * 100\%}{x_{i,jmax} - x_{i,jmin}} \quad (3a), \quad I_{i,j} = \frac{(x_{i,jT} - x_{i,jmax}) * 100\%}{x_{i,jmin} - x_{i,jmax}}, \quad (3b)$$

где: $x_{i,jT}$ - текущее значение j -го параметра i -го узла, определенное из системы мониторинга в момент времени оценки технического состояния; $x_{i,jmax}$, $x_{i,jmin}$ - максимальное и минимальное значения j -го параметра i -го узла,

определенные по паспортным данным или данным испытаний.

Определение весов в формулах (1) и (2) осуществляется на основе конструктивных данных и статистических характеристик рабочих параметров объекта [7, 8].

На практике оборудование эксплуатируется до некоторого порогового значения ИТС (далее ИТС_п). Ниже порогового значения оборудование будет эксплуатироваться и будет выведено из эксплуатации по ряду причин. Например, согласно методики Минэнерго РФ при ИТС < 25% оборудование будет выведено из эксплуатации. Своевременная и адекватная оценка ИТС_п обеспечит надежность эксплуатации оборудования и уменьшит техногенные риски. Кроме того, его можно использовать для прогнозирования остаточного срока службы (Remaining Useful Life - RUL) объекта на основе прогноза ИТС объекта и определения интервала времени, по истечению которого ИТС достигнет порогового значения (рис. 1).

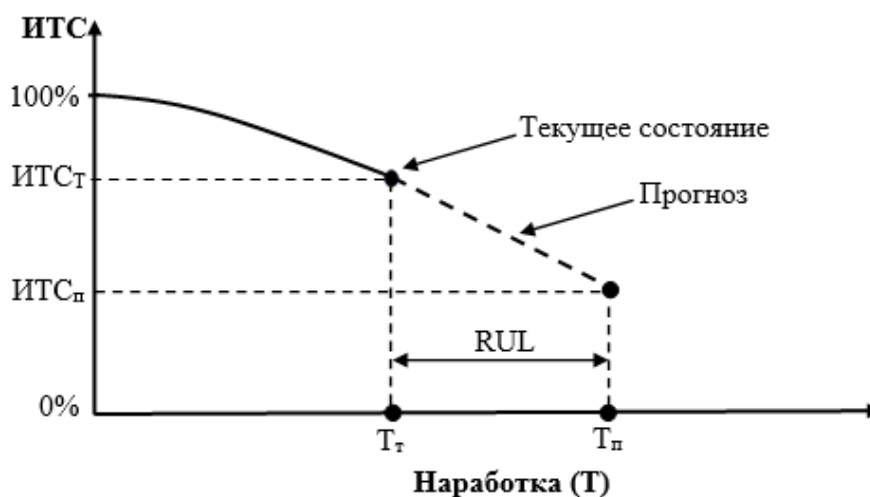


Рис. 1. - Иллюстрация прогнозирования остаточного ресурса на основе ИТС_п

Однако определение порогового значения ИТС объекта зависит от многих факторов, особенностей оборудования, в том числе отраслевых условий и опыта эксплуатации в конкретной области. Например, при эксплуатации электрооборудования энергосистем по данным Минэнерго

России пороговое значение принято $ИТС_{п} = 25\%$, при достижении которого электрооборудование подлежит выводу из эксплуатации.

В работе предложена методика определения порогового значения ИТС на основе известного допустимого уровня техногенного риска, измеряемого величиной вероятности безотказной работы оборудования, с использованием статистических методов.

Методика определения порогового значения модифицированного индекса технического состояния оборудования

Даны результаты испытаний параметров работы множества однотипных технических объектов с момента ввода их в эксплуатацию до выхода из строя. Необходимо определить пороговое значение $ИТС_{п}$ для данного типа объектов, при котором объект не будет эксплуатироваться, будет снят с эксплуатации из-за недостаточной надежности, безопасности или высокой стоимости восстановления.

Методика определения $ИТС_{п}$ на основе вероятности безотказной работы оборудования включает следующие этапы.

Шаг 1. На основе модели и алгоритма [7, 8] определяют ИТС объектов в заданном тестовом наборе данных на момент снятия их с эксплуатации. Результаты данного шага представлены в виде таблицы 1.

Таблица № 1

Результаты расчета ИТС для объектов тестового набора данных на момент снятия их с эксплуатации

| Объект | Значение ИТС, % |
|------------|-----------------|
| Объект 1 | $ИТС_{п1}$ |
| Объект 2 | $ИТС_{п2}$ |
| ... | ... |
| Объект N | $ИТС_{пN}$ |

Шаг 2. Рассчитывают статистическую оценку вероятности безотказной работы до момента, когда ИТС станет меньше или равен заданному

значению ИТС (далее $ИТС^*$).

Следует отметить, что ИТС технического объекта в процессе эксплуатации будет постепенно снижаться от значения 100 (в процентах) до порогового значения, которое предстоит определить. Для расчета статистической оценки вероятности безотказной работы технического объекта до момента, когда ИТС станет меньше или равен определенному значению ($ИТС^*$), используется статистический метод определения вероятности безотказной работы по формуле (4)

$$\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*) = \frac{N(ИТС)}{N}, \quad (4)$$

где: $\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*)$ - статистическая оценка вероятности безотказной работы технического объекта до момента, когда ИТС станет меньше или равен заданному значению ($ИТС^*$); $N(ИТС)$ - количество технических объектов, которые работают без отказов до тех пор, пока ИТС не станет меньше или равен заданному значению ($ИТС^*$); N - количество испытуемых объектов, включенных в тест.

Шаг 3. Определяют пороговое значение вероятности безотказной работы технического объекта для обеспечения заданной величины надежности (P_n).

Надёжность характеризуется и достигается выполнением ряда показателей. Среди основных показателей надёжности часто используют вероятность безотказной работы. Вероятность безотказной работы - безразмерный показатель, он изменяется в пределах от 0 до 1, однако при его назначении или определении необходимо указывать время или наработку (ГОСТ 27.002-2015, 2017). Наименьшее допустимое значение вероятности безотказной работы для каждого вида технического объекта может определяться в соответствии с существующими нормативными актами, иными руководящими материалами или результатами исследований и

рекомендаций специалистов. Например, для самолета с невозстанавливаемой техникой допустимое значение вероятности безотказной работы рекомендуется не менее 0.90 [9].

Шаг 4. При заданном значении ИТС ($ИТС^*$), когда статистическая оценка вероятности безотказной работы определенная по формуле (4), равна пороговому значению вероятности безотказной работы по регламенту ($\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*) = P_n$), определяют среднее пороговое значение ИТС по выборке из n технических объектов (далее $\overline{ИТС}_n$).

Шаг 5. Определяют погрешность порогового значения индекса технического состояния.

Погрешность порогового значения будет зависеть от количества объектов, включенных в тест, и доверительной вероятности. Погрешность порогового значения ИТС определяется по формуле (5):

$$\Delta_{ИТС_n} = t_{\alpha, n} * \sigma_{\overline{ИТС}_n}, \quad (5)$$

где: $t_{\alpha, n}$ - коэффициент Стьюдента; α - доверительная вероятность погрешности; n - количество объектов, включенных в тест; $\sigma_{\overline{ИТС}_n}$ - средняя квадратичная ошибка.

Шаг 6. Доверительный интервал для порогового значения ИТС определяется по формуле (6):

$$\overline{ИТС}_n - \Delta_{ИТС_n} \leq ИТС_n \leq \overline{ИТС}_n + \Delta_{ИТС_n} \quad (6)$$

Расчет порогового значения индекса технического состояния на основе статистического набора данных

Расчет пороговых значений ИТС проводился для турбореактивных двухконтурных двигателей на основе набора данных FD001, опубликованного NASA в 2008 году [10]. Это тестовый набор данных, регистрирующий рабочие параметры 100 турбореактивных двухконтурных двигателей одного типа с момента их ввода в эксплуатацию до момента

вывода из эксплуатации.

По методике, предложенной авторами в работах [7, 8], был выполнен расчет ИТС двигателей на момент снятия их с эксплуатации. Результаты расчета ИТС представлены в таблице 2.

Таблица № 2

ИТС двигателей на момент снятия с эксплуатации

| Объект | ИТС, % | Объект | ИТС, % | Объект | ИТС, % | Объект | ИТС, % |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 37.560 | 26 | 45.227 | 51 | 40.809 | 76 | 43.556 |
| 2 | 30.560 | 27 | 41.663 | 52 | 37.435 | 77 | 43.188 |
| 3 | 37.343 | 28 | 35.699 | 53 | 36.667 | 78 | 32.909 |
| 4 | 34.919 | 29 | 39.781 | 54 | 35.946 | 79 | 34.526 |
| 5 | 31.771 | 30 | 33.321 | 55 | 39.715 | 80 | 42.578 |
| 6 | 38.299 | 31 | 34.402 | 56 | 43.122 | 81 | 42.182 |
| 7 | 36.304 | 32 | 44.592 | 57 | 33.647 | 82 | 34.428 |
| 8 | 42.332 | 33 | 36.382 | 58 | 37.504 | 83 | 34.814 |
| 9 | 37.965 | 34 | 40.044 | 59 | 34.940 | 84 | 46.365 |
| 10 | 36.456 | 35 | 39.750 | 60 | 38.714 | 85 | 41.286 |
| 11 | 35.513 | 36 | 42.813 | 61 | 34.148 | 86 | 43.352 |
| 12 | 41.663 | 37 | 39.740 | 62 | 44.922 | 87 | 38.700 |
| 13 | 43.050 | 38 | 42.518 | 63 | 40.965 | 88 | 37.033 |
| 14 | 41.021% | 39 | 38.766 | 64 | 36.543 | 89 | 33.006 |
| 15 | 33.278 | 40 | 43.306 | 65 | 36.177 | 90 | 37.546 |
| 16 | 40.615 | 41 | 37.543 | 66 | 46.157 | 91 | 42.482 |
| 17 | 32.271 | 42 | 40.079 | 67 | 39.164 | 92 | 37.590 |
| 18 | 38.049 | 43 | 33.488 | 68 | 38.873 | 93 | 34.509 |
| 19 | 46.108 | 44 | 36.425 | 69 | 36.514 | 94 | 42.451 |
| 20 | 43.985 | 45 | 33.276 | 70 | 36.441 | 95 | 34.287 |
| 21 | 40.468 | 46 | 33.284 | 71 | 40.693 | 96 | 34.422 |
| 22 | 44.596 | 47 | 34.975 | 72 | 37.430 | 97 | 38.264 |
| 23 | 41.783 | 48 | 38.963 | 73 | 43.213 | 98 | 35.481 |
| 24 | 34.900 | 49 | 43.177 | 74 | 36.195 | 99 | 34.969 |
| 25 | 39.594 | 50 | 37.119 | 75 | 41.093 | 100 | 36.247 |

Проверим закон распределения набора данных ИТС для 100 технических объектов на момент снятия с эксплуатации. Выдвигаемая нулевая статистическая гипотеза H_0 : значения индексов технического состояния рассматриваемого типа объектов на момент снятия с

эксплуатации подчинены нормальному закону распределения (с уровнем значимости 0.05).

Графики эмпирического и теоретического распределений ИТС объектов выборочной совокупности на момент снятия с эксплуатации приведены на рисунке 2. Количество интервалов согласно формуле Стёрджеса составило 8.

Проверка гипотезы H_0 выполнена с использованием критерия согласия Пирсона и получены следующие результаты: критическое значение критерия $\chi_{кр.}^2 \approx 11.1$, наблюдаемое значение критерия $\chi_{набл.}^2 \approx 9.71$.

Полученные результаты ($\chi_{набл.}^2 < \chi_{кр.}^2$) подтверждают, что на уровне значимости 0.05 нулевая гипотеза о нормальном распределении совокупности ИТС верна.

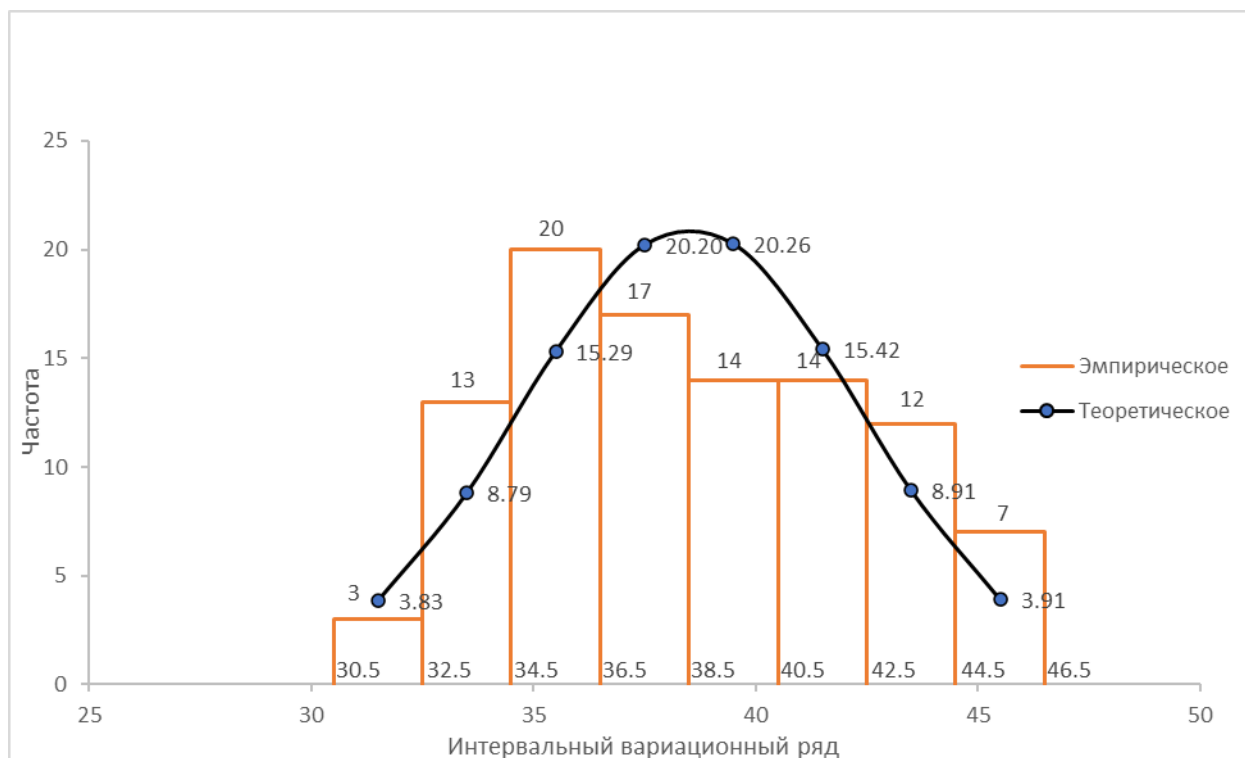


Рис. 2. - Графики эмпирического и теоретического распределений ИТС на момент вывода объектов из эксплуатации

На основании таблицы 2 согласно (4) рассчитаны значения вероятности безотказной работы технического объекта, результаты расчета представлены

в таблице 3.

Таблица № 3

Значения вероятности безотказной работы
технических объектов

| $ИТС^*$, % | $\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*)$ | $ИТС^*$, % | $\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*)$ | $ИТС^*$, % | $\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*)$ | $ИТС^*$, % | $\hat{P}(ИТС \leq ИТС^*)$ |
|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|
| 100 | 1 | 42.2 | 0.78 | 37.97 | 0.5 | 34.97 | 0.23 |
| 80 | 1 | 41.8 | 0.77 | 37.6 | 0.49 | 34.94 | 0.22 |
| 70 | 1 | 41.7 | 0.76 | 37.56 | 0.48 | 34.92 | 0.21 |
| 60 | 1 | 41.3 | 0.74 | 37.55 | 0.47 | 34.91 | 0.2 |
| 50 | 1 | 41.1 | 0.73 | 37.544 | 0.46 | 34.82 | 0.19 |
| 47 | 1 | 41.03 | 0.72 | 37.51 | 0.45 | 34.6 | 0.18 |
| 46.2 | 0.99 | 40.97 | 0.71 | 37.44 | 0.44 | 34.51 | 0.17 |
| 46.15 | 0.98 | 40.81 | 0.7 | 37.431 | 0.43 | 34.43 | 0.16 |
| 46 | 0.97 | 40.694 | 0.69 | 37.35 | 0.42 | 34.425 | 0.15 |
| 45 | 0.96 | 40.62 | 0.68 | 37.2 | 0.41 | 34.41 | 0.14 |
| 44.6 | 0.95 | 40.5 | 0.67 | 37.1 | 0.4 | 34.3 | 0.13 |
| 44.596 | 0.94 | 40.1 | 0.66 | 36.7 | 0.39 | 34.2 | 0.12 |
| 44 | 0.93 | 40.05 | 0.65 | 36.6 | 0.38 | 33.7 | 0.11 |
| 43.6 | 0.92 | 39.8 | 0.64 | 36.52 | 0.37 | 33.5 | 0.1 |
| 43.4 | 0.91 | 39.76 | 0.63 | 36.46 | 0.36 | 33.4 | 0.09 |
| 43.31 | 0.9 | 39.74 | 0.62 | 36.45 | 0.35 | 33.29 | 0.08 |
| 43.22 | 0.89 | 39.72 | 0.61 | 36.43 | 0.34 | 33.28 | 0.07 |
| 43.19 | 0.88 | 39.6 | 0.6 | 36.39 | 0.33 | 33.276 | 0.06 |
| 43.18 | 0.87 | 39.2 | 0.59 | 36.31 | 0.32 | 33.1 | 0.05 |
| 43.13 | 0.86 | 38.97 | 0.58 | 36.25 | 0.31 | 33 | 0.04 |
| 43.06 | 0.85 | 38.88 | 0.57 | 36.2 | 0.3 | 32.3 | 0.03 |
| 42.9 | 0.84 | 38.77 | 0.56 | 36.18 | 0.29 | 31.8 | 0.02 |
| 42.58 | 0.83 | 38.72 | 0.55 | 35.95 | 0.28 | 31 | 0.01 |
| 42.52 | 0.82 | 38.71 | 0.54 | 35.7 | 0.27 | 30.5 | 0 |
| 42.49 | 0.81 | 38.3 | 0.53 | 35.6 | 0.26 | 20 | 0 |
| 42.46 | 0.8 | 38.27 | 0.52 | 35.5 | 0.25 | 10 | 0 |
| 42.34 | 0.79 | 38.1 | 0.51 | 34.98 | 0.24 | 0 | 0 |

График зависимости вероятности безотказной работы от значений ИТС объектов представлена на рис. 3. При заданном допустимом значении вероятности безотказной работы объекта [9] ($P_n = 0.90$) среднее пороговое значение ИТС объекта составило $\overline{ИТС}_n = 43.31\%$.

Погрешность порогового значения ИТС (при доверительной вероятности $\alpha = 0.9$, количестве объектов в тестовой выборке $n = 100$) составляет: $\Delta_{ИТС_{п}} = 1.01\%$. Доверительный интервал для ИТС_п: $42.3\% \leq ИТС_{п} \leq 44.32\%$.

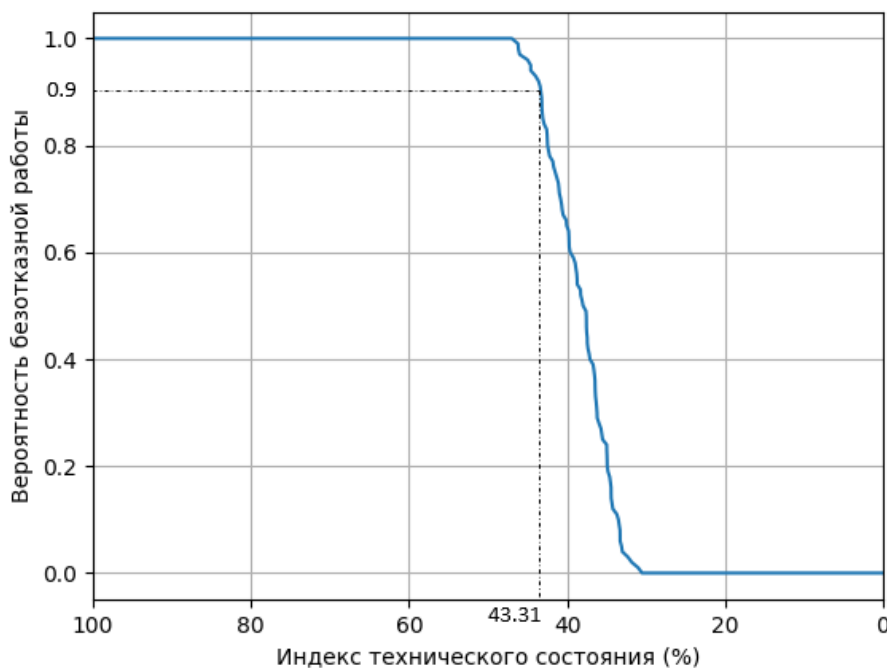


Рис. 3. - График изменения величины вероятности безотказной работы в зависимости от ИТС

Заключение

В статье предложена методика определения порогового значения ИТС объекта на основе допустимого значения вероятности безотказной работы и статистических данных выборки из 100 однотипных технических устройств. На основе статистических данных NASA выполнен расчет порогового значения ИТС. С использованием критерия Пирсона доказана возможность использования статистических данных для расчета порогового значения ИТС с заданной вероятностью.

Приведенные результаты показывают возможность использования ИТС для оценки состояния оборудования с заданной доверительной вероятностью. Это позволяет с использованием информационной системы

мониторинга в реальном режиме времени оценивать состояние оборудования и прогнозировать остаточный ресурс.

Новизна предлагаемой методики заключается в предоставлении инструмента для оценки пороговых значений ИТС для оборудования с учетом отраслевых особенностей и условий эксплуатации, а также в использовании объективных данных вместо экспертных оценок.

Литература

1. 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.

2. 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.

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

4. Ahmad R., Kamaruddin S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application // Computers & Industrial Engineering. 2012. №63. pp. 135-149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.

5. Гаврилюк Е. А., Манцеров С. А. Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 3 (118). С. 121-126.

6. Левин В. М., Гужов Н. П., Боярова Д. А. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию // Известия высших учебных

заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. №1. С. 39-51.
DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.

7. Хиеу В. Д., Файзрахманов Р. А. Методика и алгоритм экспресс оценки состояния сложных технических систем. Конструктивный подход. // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172.

8. Хиеу В. Д., Файзрахманов Р. А. Модифицированная модель индекса технического состояния системы. Алгоритм расчета и анализ применимости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 50. С. 5–24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01.

9. Лукасов В. В. Вероятность безотказной работы авиационной техники // X Международная научно-практическая конференция. Иркутск, 2021. Т. 1. С. 44-48.

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

References

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

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

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

4. Ahmad R., Kamaruddin S. Computers & Industrial Engineering. 2012. №63. pp. 135-149. DOI: 10.1016/j.cie.2012.02.002.



5. Gavriljuk E. A., Mancеров S. A. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. 2017. №3 (118). pp. 121-126.
6. Levin V. M., Guzhov N. P., Bojarova D. A. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY JeNERGETIKI. 2022. T.24. №1. pp. 39-51. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.
7. Hieu V. D., Fayzrakhmanov R. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9172.
8. Hieu V. D., Fayzrakhmanov R. A. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija. 2024. №50. pp. 5–24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.01.
9. Lukasov V. V. X Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija. Irkutsk, 2021. T. 1. pp. 44-48.
10. Turbofan engine degradation simulation data set. URL: c3.nasa.gov/dashlink/resources/139/ (date accessed: 16.12.2022).

Дата поступления: 17.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025