

затверджене наказом Міністерства палива та енергетики України від 02.11.2005 № 559.
8. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ, остаточна редакція 05.04.2015.

9. Модульная объектно-ориентированная динамическая обучающая среда // офиц. сайт Moodle. – Режим доступа: <https://moodle.org/> (24.09.2015). – Название с экрана.

10. Аветисян Е.В., Гурсев В.А., Сангина О.В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України // Вісник вінницького політехнічного інституту, 1(124), 2016. – С.101-107.

Поступила 16.10.2017р.

УДК 620.17:681.3:004.9

Н.Б. Марченко, Л.М. Щербак, Київ

МОНІТОРИНГ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДІЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Abstract. The problem of research methods and algorithms for automating the monitoring and forecasting residual life of existing technical facilities for generalized performance indicators and to develop preferred approach to planning repair and maintenance work on the current state of equipment.

Вступ. Більшість технічних об'єктів і систем у промислових галузях господарства України відпрацювало свій розрахунковий технічний ресурс, але знаходиться на сьогодні в експлуатації. Така ситуація обумовлює вирішення цілої низки науково-технічних проблем, одна з найбільш актуальних це оцінка залишкового ресурсу і розробка методології планування і проведення ремонтних робіт. Напрацьовані результати цієї проблематики в останній час зростають і це пов'язано з тим, що класичні методи не дають на них відповіді, а розробка нових є актуальною і важливою проблемою [1].

Більша частина діючого обладнання експлуатується на своїй завершальній стадії – стадії передруйнування. На цій стадії механізми пошкоджуваності і, як наслідок, механізми зменшення робочого ресурсу основних елементів складної технічної системи сильно відрізняються від стадії експлуатації в межах розрахункового технологічного ресурсу. Все більше починає переважати спонтанність, ніж строга закономірність. Частіше спостерігаються порогові зміни як властивостей матеріалу, так і часових показників розвитку небезпечних дефектів. На рис. 1 показана графічна схема ймовірності відмов енергообладнання теплоелектростанцій (ТЕС) в різні періоди її експлуатації [1, 2].

Методи оцінка надійності складного технічного об'єкту ґрунтується на тому, що усі технологічні порушення, що відбуваються на контрольованому

устаткуванні, і пов'язані з ними відмови розглядаються в часі, як послідовність подій. Експлуатація складного енергообладнання характеризується потоком несправностей і відмов, для усунення яких проводяться ремонтно-профілактичні роботи. Розрізняють поточні і капітальні ремонти. Відповідно до цього потоки подій можна розділити на два потоки – потік поточних несправностей і потік повних відмов. При нормальній експлуатації потік повних відмов зведений до мінімуму за рахунок профілактичних робіт і капітальних ремонтів. Тому статистика експлуатації відбиває в основному потік несправностей, який надалі і розглядатимемо [3, 4].

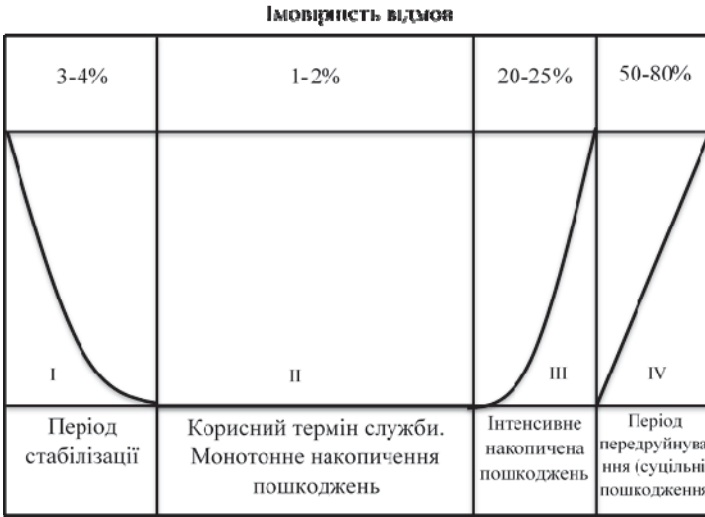


Рис. 1. Графічна ілюстрація оцінок ймовірності відмов по реальним даним

Потік несправностей характеризується наступними інтегральними показниками: параметром потоку $\lambda_H(t)$ (для однорідного потоку – інтенсивність подій) і часом між подіями $\tau_H(t)$ (зворотна величина $\lambda_H(t)$) [5, 6]. Потоки несправностей і відмов відбивають зовнішню сторону експлуатації. Внутрішня сторона характеризується глибинними процесами, пов'язаними зі зниженням ресурсу обладнання в процесі експлуатації, а саме, параметричних ресурсів, які відбивають запас зміни параметрів об'єкта контролю до критичної межі. Для обладнання, що давно перебуває в експлуатації, доцільно оцінювати еволюцію значень показників працездатності обладнання в процесі експлуатації. Графічна ілюстрація типової траєкторії еволюції значень показників працездатності наведена на рис. 2. В ролі показників працездатності використовуються найрізноманітніші параметри технічного стану обладнання, що контролюються в процесі

технічного обслуговування і його експлуатації [3]. Відповідно до графіка рис. 2 параметричний ресурс за показником працездатності визначатимемо по формулі:

$$r_i(t) = \left[\frac{\Pi_{ДОД}^{AB} - \Pi_i(t)}{\Pi_{ДОД}^{AB} - \Pi_{НОМ}} \right] \quad (1)$$

де Π_i – поточне значення i -ого параметричного показника працездатності; $\Pi_{ДОД}^{AB}$ – граничне (аварійне) значення Π_i ; $\Pi_{НОМ}$ – номінальне (робоче) значення Π_i ; r_i – частинний параметричний ресурс контролюваного агрегату по Π_i .

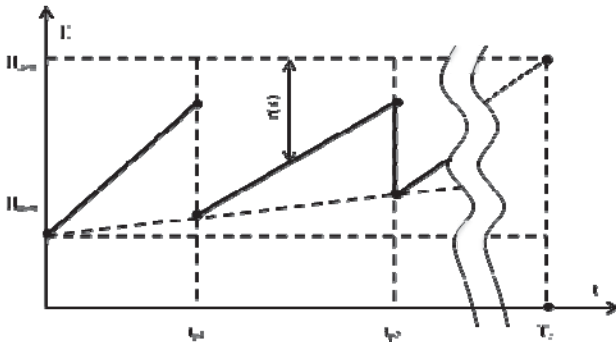


Рис. 2. Графічне представлення типової траєкторії еволюції значень показника працездатності: Π – показник працездатності ($\Pi_{ДОД}^{AB}$ – гранично допустиме значення, $\Pi_{НОМ}$ – номінальне значення), t_{pi} – терміни ремонтних робіт, T_c – оцінка граничного терміну служби обладнання

В якості прикладу, на рис. 3 наведений графік еволюції параметричного ресурсу за показником працездатності відповідний рис. 2.

Ідентифікацію параметрів процесу зміни ресурсу при експлуатації необхідно виконувати на основі інформації з різних джерел, таких як: результати обстежень під час ремонтних робіт; результати поточного контролю з використанням різних методів; статистики аварій; експертні оцінки [6, 7].

Загальний стан об'єкту контролю характеризується також режимними чинниками, що враховують умови і режими експлуатації технічного об'єкту, перевищення встановлених значень яких погіршує стан об'єкту. Дія режимних чинників носить, як правило, інтегральний характер, тому нормуються їх інтегральні величини:

$$\rho_j(t) = 1 - b \int_{t_k}^t \phi_j(\tau) d\tau, \quad (2)$$

$$\phi_j(t) = \begin{cases} \left| P_{\text{ДОД}}^+ - P_j(t) \right|, & P_j(t) \notin [P_{\text{ДОД}}^-, P_{\text{ДОД}}^+] \\ 0, & P_j(t) \in [P_{\text{ДОД}}^-, P_{\text{ДОД}}^+] \end{cases} \quad (3)$$

де $P_j(t)$ – j -ий режимний показник працездатності в момент часу t ; ρ_j – частинний режимний ресурс контролюваного агрегату по P_j ; ϕ_j – функція відхилення P_j від діапазону допустимих значень $[P_{\text{ДОД}}^-, P_{\text{ДОД}}^+]$; b – нормуючий коефіцієнт; $[t_k, t]$ – інтервал часу з моменту закінчення k -того розглянутого ремонту до поточного моменту часу.

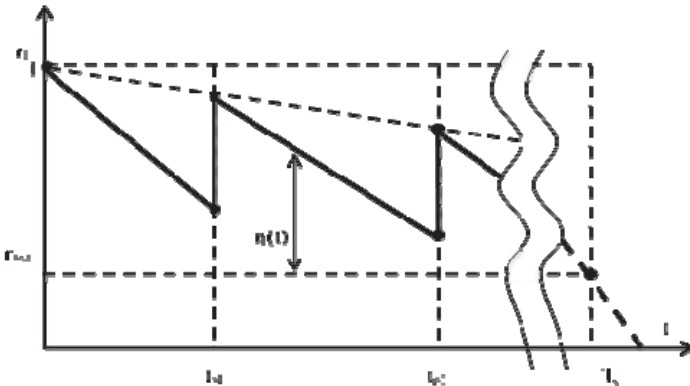


Рис. 3. Графік еволюції параметричного ресурсу за показником працездатності: $r_{\text{ДОД}}$ – граничне допустиме значення ресурсу агрегату по i -му показнику працездатності; $r_i(t)$ – поточне значення ресурсу агрегату по i -му показнику працездатності; t_{pi} – терміни капітальних ремонтних робіт, T_c – оцінка граничного терміну служби обладнання

Таким чином, об'єкт контролю характеризується набором частинних ресурсів (рис. 4), число яких для складних технічних об'єктів може бути дуже велике:

$$\{R_i(t) : i \in I_R\} \quad (4)$$

де $R_i(t)$ – частинний ресурс агрегату по i -му показнику працездатності; I_R – індексна множина частинних ресурсів.

Типовим підходом до оцінки узагальненого ресурсу агрегату в даний час

є виявлення «вузьких» місць, тобто виявлення показників працездатності, за якими частинний ресурс контрольованого агрегату є мінімальним. Аналітично даний підхід можна записати в наступному вигляді [1]:

$$R_{\min}(t) = \min_{(i \in I_R)} \{R_i(t)\}, \quad (5)$$

де $R_{\min}(t)$ – оцінка критичного ресурсу агрегату; R_i – усі розглянуті приватні ресурси без градації на параметричні і режимні показники.

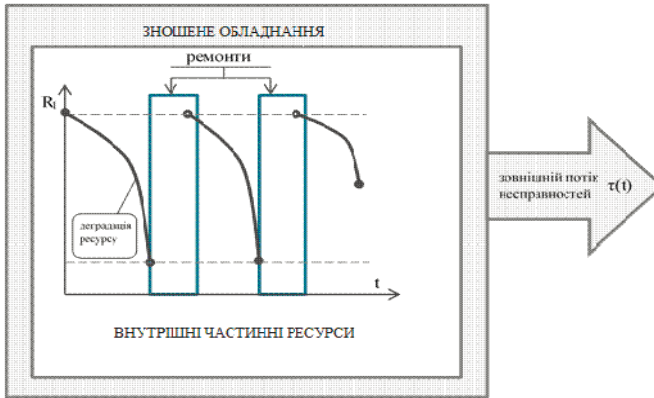


Рис. 4. Графічне представлення ресурсу обладнання: $\{R_i\}$ – множина частинних ресурсів; $\tau(t)$ – час між подіями зовнішнього потоку несправностей

Перевагою цього підходу є можливість оцінки повної відмови обладнання, а також його діагностичні властивості, тобто завжди можна локалізувати "найгірший" показник працездатності. Проте разом із завданням оцінки внутрішнього технічного стану агрегату існує завдання зовнішньої оцінки його технічного стану, необхідне для оцінки надійності усього технологічного комплексу в цілому, елементом якого являється цей агрегат. Типовим підходом узагальненої зовнішньої оцінки агрегату є оцінка параметра потоку несправностей λ_H і пов'язаною з ним оцінкою часу між подіями цього потоку τ_H . Для ординарного потоку подій [1, 6]:

$$\lambda_H = \frac{1}{\tau_H} \quad (6)$$

У загальному випадку параметри λ_H і τ_H є випадковими величинами, що мають нестационарний характер.

У роботі розглядаються два основні завдання:

- 1) завдання оперативного розпізнавання передаварійної ситуації;

2) оцінка поточного залишкового ресурсу діючого обладнання. Розглянемо постановку завдання оперативного розпізнавання передаварійної ситуації на контрольованому устаткуванні. Необхідно знайти функцію:

$$R_0(\{R_i\}, t) \leq R_d : \mu(t), \quad (7)$$

де R_0 – узагальнений параметричний ресурс обладнання; R_d – значення передаварійної межі для узагальненого параметричного ресурсу; $\mu(t)$ – індикаторна функція.

Функція (6) описує два основні стани контрольованого обладнання:

а) якщо нерівність (6) виконана, то для контрольованого обладнання прогнозується аварійна ситуація на найближчому інтервалі часу Δt_p ;

б) невиконання нерівності (6) свідчить про те, що аварійна ситуація для контрольованого обладнання в найближчий час не прогнозується.

Можливі наступні помилки розв'язку нерівності (6):

1) вирішальною функцією прогнозується нормальна робота обладнання, а насправді сталася відмова – ситуація пропуску аварійної ситуації $\mu_{\text{ПР}}(t) = 1$

2) вирішальною функцією прогнозується аварійна ситуація на устаткуванні, а насправді відмови не було – ситуація виникнення помилкової тривоги $\mu_{\text{ЛТ}}(t) = 1$.

Запишемо відносні частоти виникнення вказаних помилок розв'язку:

$$P_{\text{ПР}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \mu_{\text{ПР},s}(t) \quad (8)$$

$$P_{\text{ЛТ}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \mu_{\text{ЛТ},s}(t) \quad (9)$$

де N – загальне число даних відмов.

У роботі пропонується узагальнений параметричний ресурс обладнання розраховувати по формулі

$$R_0(t) = \prod_{i=1}^n R_i^{a_i}(t) \quad (10)$$

$$a_i \geq 0, \sum_i a_i = 1, i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

де a_i – питоми вагові коефіцієнти частинних параметричних ресурсів у складі узагальнених; n – загальне число частинних ресурсів.

З визначення узагальненого ресурсу (10) і обмежень (11), що накладаються, видно, що він відбиває аварійні ситуації для складного агрегату. Оскільки якщо за певним частинним параметричним показником виникла аварійна ситуація ($R_i(t) = 0$), то $R_0(t)$ також покаже аварійну ситуацію $R_0(t) = 0$ і навпаки, якщо усі параметричні частинні показники знаходяться в області своїх робочих значень ($R_i(t) = 1, i = \overline{1, n}$), то і узагальнений ресурс покаже нормальний робочий стан обладнання в цілому

($R_0(t) = 1$). При цьому, якщо один з вагових коефіцієнтів частинних ресурсів рівний 1 ($a_i = 1$), то узагальнений ресурс дорівнюватиме значенню відповідного частинного ресурсу. Отже, ця оцінка може бути використана для розв'язку задачі оперативного розпізнавання передаварійних ситуацій на контрольованому обладнанні [2, 8].

У результаті, ставиться завдання знайти оптимальні значення a_i і R_d з точки зору мінімуму пропусків аварійних ситуацій і виникнення помилкових тривог. Формалізована постановка завдання:

$$\min_{\{a_i\}, R_d} (P_{PP} + P_{LT}) \quad (12)$$

Далі розглянемо постановку завдання оцінки поточного параметричного залишкового ресурсу діючого обладнання.

Для оцінки поточного залишкового ресурсу обладнання, вираженого в одиницях часу, необхідно знайти функціональну залежність

$$\tau_H(t) = a_0 R_0(\{R_i\}, t) \quad (13)$$

де τ_H – оцінка часу між відмовами даного потоку; a_0 – масштабний коефіцієнт ($a_0 > 0$).

Для оцінки залишкового ресурсу у відносних одиницях (0..1 або 0..100%) необхідно виконувати обчислення за наступною формулою:

$$R_{ЗАЛ}(t) = \frac{\tau_H(t) - t}{\tau_H(t)} \quad (14)$$

де $R_{ЗАЛ}$ – залишковий ресурс обладнання; t – поточний час з моменту закінчення останнього поточного ремонту.

Функціональна залежність (13) визначається за формулою:

$$\tau_H(t) = t + \Delta\tau(t) : v(t) \quad (15)$$

$$\Delta\tau(t) = a_0 \prod_{i=1}^n R_i^{\sigma_i}(t) \quad (16)$$

$$\sigma_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \sigma_i = 1, i = \overline{1, n} \quad (17)$$

де $\Delta\tau$ – інтервал часу між відмовами τ_H ; σ_i – питомі вагові коефіцієнти даних частинних ресурсів обладнання у складі $\Delta\tau$; a_0 – масштабний коефіцієнт; $v(t)$ – індикаторна функція відмов.

В цьому випадку можливі помилки, аналогічні розглянутим раніше, а саме:

1) $v_{PP}(t) = 1$ – пропуск аварійної ситуації, тобто $\tau_H(t)$ свідчить про те, що найближчим часом на устаткуванні відмов не передбачається, а фактично відмова була;

2) $v_{JT}(t) = 1$ – виникнення помилкової тривоги, тобто $\tau_H(t)$ свідчить про те, що на устаткуванні найближчим часом очікується відмова, якої насправді немає.

Відносні частоти виникнення вказаних помилок запишемо по аналогії з формулами (8) і (9):

$$P_{PP}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N v_{PP,S}(t) \quad \text{та} \quad P_{JT}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N v_{JT,S}(t)$$

де N – загальне число даних відмов.

У результаті ставиться завдання знайти оптимальні значення σ_i і a_0 з точки зору мінімуму пропусків аварійних ситуацій і виникнення помилкових тривог. Формалізація поставленого завдання:

$$\min_{\{\sigma_i\}, \zeta_0} (P_{PP} + P_{JT}).$$

Висновки. Запропонована методика оцінки поточного залишкового ресурсу контрольованого обладнання за узагальненими показникам в реальному часі на основі даних експлуатації, що дозволяють автоматизувати моніторинг і прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Розроблений алгоритм оперативного розпізнавання передаварійних ситуацій на контрольованому устаткуванні, заснований на оцінці залишкового ресурсу по статистичних і поточних значеннях даних узагальнених показників працездатності, що дозволяє попереджати можливі відмови і непередбачені аварійні ситуації, що, у свою чергу, сприяє підвищенню надійності і безпеки експлуатації обладнання.

1. *Канцедалов В.Г.* Новые аспекты в теории и практике надежности энергооборудования ТЭС, вырабатывающего физический ресурс / В.Г. Канцедалов // Электрические станции, 2010. – №3. – С.12-18.
2. *Marchenko N.B.* Digital orthogonal filtration of spatiotemporal signals in multichannel correlation systems / N.B. Marchenko, E.P. Nechyporuk //The Advanced Science Open Access Journal. – December 2012. – ISSUE 5. – P.115-119.
3. *Назарычев А.Н.* Обоснование сроков эксплуатации оборудования/ А.Н. Назарычев, А.И. Гаджибаев // Промышленная энергетика, 2015. – №4. – С.20.
4. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
5. *Болотин В.В.* Распределение времен до разрушения при случайных нагрузках/ В.В. Болотин // Журнал прикладной механики и технической физики, 2010. – №5. – С. 149-158.
6. Надежность технических систем: Справочник / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
7. *Marchenko N.B.* Simulation of nonstationary energetic random processes with the use of stochastic linear processes / N.B. Marchenko, E.P. Nechyporuk //The Advanced Science Open Access Journal. – December 2012. – ISSUE 6. – P.64-70.

8. Шумова Л.А. Автоматизация процесса верификации прогнозных моделей в задачах управления динамическими системами / Л. А. Шумова // VI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 4-11 июня 2010 г., Варна, Болгария : материалы. – Д. ; Варна, 2010. – Т. 2, (ч. 2). – С.678-680.

Поступила 23.10.2017р.

УДК 519.633.6

В.В. Хайдуров, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Abstract. The scientific and practical nonlinear optimization problems of the XXI century need to develop effective methods for their solution. Nonlinear inverse heat conduction problems are a separate layer of problems, which require a lot of time to solve. This type of problem is referred to conditional optimization problems. It should be noted that the heat conductivity equation itself is the limitation here. In the process of finding a numerical solution of such problems, the question of its regularization often arises. Problems have an incorrect formulation. The paper considers the main methods that can and should be applied in solving inverse heat conduction problems, in particular, problems that need to find the coefficient of thermal conductivity of some investigated object. A comparative analysis of the application of the finite element method and the method of finite differences in solving of this type of problem is carried out.

Вступление. Обратные задачи теплопроводности (ОЗТ) – это класс задач условной оптимизации, в которых главным ограничением выступает само уравнение теплопроводности. Данный класс задач встречается в работах, например, в [1], где исследовалась устойчивость полученных численных решений рассматриваемых задач. ОЗТ делятся на подклассы в зависимости от технического задания: ОЗТ на восстановления начального условия, ОЗТ на восстановления краевых условий, ОЗТ на восстановление теплофизических характеристик некоторого рассматриваемого объекта и т.д. [1; 3]. Для нахождения численного решения одной ОЗТ, нужно несколько раз находить численные решения прямых задач теплопроводности (ПЗТ). Любая ПЗТ сводится к решению системы алгебраических уравнений (СЛАУ), у которой главная матрица имеет разреженную структуру [1, 2, 6, 7]. На сегодняшний день существует ряд прикладных программных пакетов, которые работают с разреженными матрицами. Выбор численного решения ПЗТ есть первично важным фактором, который используется при решении ОЗТ [4]. В работе рассмотрены основные современные методы