

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТОЧНОГО ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРШОЧЕРГОВИХ ЗАХОДІВ РЕМОНТНО- ПРОФІЛАКТИЧНИХ РОБІТ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

**Abstract.** The problem of forecasting the values of the current residual equipment resource with the calculation of the reliability of the predicted values for a certain time interval while solving practical problems is considered. The approach to priority planning of repair and prophylactic works at the shortage of the repair fund by the establishment of repair priorities is proposed.

**Вступ.** Оцінка поточного стану обладнання у складі складних технологічних комплексів (ТК) і прогноз його стану у рамках автоматизованої системи управління (АСУ) технологічних процесів є нині одним з пріоритетних завдань при побудові автоматизованих систем. Досвід показує, що проблема оцінки залишкового ресурсу діючого обладнання, яке відпрацювало розрахунковий ресурс і перебуває в режимі експлуатації, є комплексною, що включає технічний, технологічний, управлінський, економічний і організаційний аспекти, а також вимагає розробки методів і алгоритмів автоматизації процесів моніторингу і прогнозування технічного стану контрольованого обладнання в реальному часі.

Складність вирішення цієї задачі полягає в тому, що для реальних ТК число контрольованих параметрів обладнання, що впливають на виникнення і розвиток аварійних ситуацій, дуже велике, і організувати оперативний контроль усіх необхідних параметрів, як правило, неможливо. Тому для оцінки поточного стану обладнання у складі складних ТК доцільно використовувати узагальнені оцінки залишкового ресурсу, які дозволяють прогнозувати виникнення аварійних ситуацій до рівня окремих агрегатів (а не вузлів агрегату) ТК і є відносно доступними для розрахунку і контролю за даними поточної експлуатації і технічних обстежень обладнання.

На сьогодні існує безліч методів контролю і діагностики технічного стану обладнання. Ці методи, в основному, спрямовані на виявлення найбільш проблемних вузлів контрольованого агрегату з метою попередження або усунення аварійних ситуацій на цьому устаткуванні. Такий підхід для окремих агрегатів, безумовно, є виправданим, оскільки дозволяє одночасно вирішувати задачу діагностики стану обладнання і попереджати виникнення аварій на основі цілеспрямованих профілактичних ремонтів, що, у свою чергу, підвищує надійність і безпеку експлуатації цього обладнання [1].

Проте, на практиці, часто не представляється можливим проводити діагностику усього наявного парку контрольованого обладнання одночасно. Більше того, деякі методи діагностики вимагають виведення обладнання із

експлуатації. У зв'язку з цим, актуальним являється завдання автоматизованого моніторингу поточного узагальненого технічного стану обладнання у складі складного ТК в реальному часі, з метою виявлення окремих агрегатів, що вимагають проведення детальніших обстежень і, при необхідності, проведення ремонтно-профілактичних робіт. Тут знання узагальненого технічного стану обладнання дозволяє оцінити надійність усього ТК в цілому і правильно розподілити ресурси на проведення ремонтно-профілактичних робіт по видах обладнання.

Метою роботи є представлення методів і алгоритмів автоматизації моніторингу і прогнозування залишкового ресурсу контрольованого обладнання ТК за узагальненими показниками працездатності, а також розробка підходу до пріоритетного планування ремонтно-профілактичних робіт по поточному стану обладнання.

В роботі представлені алгоритми моніторингу і прогнозування залишкового ресурсу діючого обладнання по поточному стану з використанням узагальнених показників. Для цього оцінку поточного стану контрольованого агрегату пропонується здійснювати за трьома узагальненими показниками: критичний ресурс, узагальнений параметричний ресурс і залишковий ресурс обладнання [1, 2].

Критичний ресурс агрегату - це параметрична нормована оцінка найгіршого з даних показників працездатності. Ця оцінка сприяє оперативному виявленню "вузьких" місць по контрольованим параметрам даного агрегату.

Узагальнений параметричний ресурс - це агрегований показник поточного стану обладнання, заснований на зважених оцінках частинних ресурсів даного обладнання. Під частинними ресурсами агрегату розуміються параметричні нормовані оцінки його стану за окремо взятими показниками працездатності, наприклад: показники вібраційного стану обладнання; показники, що характеризують ремонтну статистику агрегату.

Залишковий ресурс - це сумарне напрацювання об'єкту від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан [3].

Використання агрегованої складної оцінки поточного стану контрольованого обладнання, обчисленої з урахуванням наявної статистики роботи агрегату, сприяє вирішенню задачі розпізнавання передаварійних ситуацій і прийняттю рішень по оперативному плануванню ремонтно-профілактичних робіт.

### **Прогнозування значень поточного залишкового ресурсу обладнання з розрахунком достовірності прогнозованих значень**

При вирішенні практичних завдань окрім, моніторингу поточного стану складного технічного об'єкту, необхідно формувати прогнозу оцінку його стану на певний інтервал часу. У роботі прогнозування залишкового і узагальненого параметричного ресурсів ТК виконується на основі апроксимації відповідно до узагальненого параметричного ресурсу

обладнання (1) і оцінки залишкового ресурсу (4), розрахованих для теперішнього моменту часу після останнього поточного ремонту [2, 4]. Узагальнений параметричний ресурс обладнання розраховується за формулою:

$$R_0(t) = \prod_{i=1}^n R_i^{a_i}(t), \quad a_i \geq 0, \sum_i a_i = 1, i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де  $a_i$  - питомі вагові коефіцієнти частинних параметричних ресурсів у складі узагальнених;  $n$  - загальне число частинних ресурсів.

З визначення узагальненого ресурсу і обмежень (1), що накладаються, видно, що він відбиває аварійні ситуації для складного агрегату. 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 ( $R_0(t) = 1$ ).

Аналітично даний підхід можна записати в наступному вигляді:

$$R_{\min}(t) = \min_{(i \in I_R)} \{R_i(t)\}, \quad (2)$$

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

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

$$\tau_H(t) = a_0 R_0(\{R_i\}, t) \quad (3)$$

де  $\tau_H$  – 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:

$$R_{ЗАЛ}(t) = \frac{\tau_H(t) - t}{\tau_H(t)} \quad (4)$$

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

Після проведення апроксимації значень ресурсів агрегату виконується екстраполяція отриманих кривих на прогнозований інтервал часу. Загальний вигляд полінома кривої апроксимації [5, 6]:

$$y(t) = \sum_{i=0}^m c_i t^i \quad (5)$$

де  $m$  – порядок апроксимації,  $c_i$  – невідомі коефіцієнти полінома, що визначається за допомогою методу найменших квадратів.

Щоб уникнути перегинів кривої апроксимації на прогнозованому

інтервалі часу в роботі був використаний 2-ой порядок кривої апроксимації. Виходячи з властивості залишкового ресурсу агрегату – власної невідновлюваності, можна зробити висновок про те, що він не зростатиме на даному і прогнозованому інтервалі часу, тобто після  $k$ -го поточного ремонту значення узагальненого ресурсу ніколи не буде рівне його значенню після  $(k-1)$ -го ремонту (де  $i=1, (k-1)$ ). Із наведеного вище випливає, що для прогнозування динаміки деградації (швидкості погіршення) узагальненого ресурсу доцільно використовувати лінійну залежність, проведену по дотичній до екстрапольованої кривої (рис. 1).

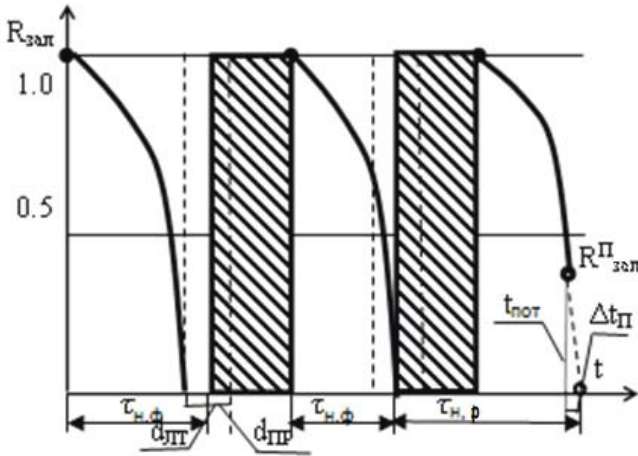


Рис. 1. Залишковий ресурс контрольованого обладнання:  $\tau_{H,Ф}, \tau_{H,Р}$  - фактичне (статистичне) і розрахункове (прогнозоване) значення  $\tau_H$  відповідно;  $d_{ПР}, d_{ЛП}$  - задана точність пропуску аварійної ситуації і виникнення помилкової тривоги відповідно;  $R_{3AL}^{II}$  - прогнозоване на даний момент значення залишкового ресурсу обладнання;  $\Delta t_{П}$  - прогнозований на даний момент час очікування настання чергової події.

Грунтуючись на поточних або прогнозованих значеннях узагальненого параметричного і залишкового ресурсів, можна виділити три основні стани контрольованого агрегату: робоче, передаварійне і аварійне [7, 8].

Робочим є стан агрегату, при якому  $R_{\min}(t_k) > 0, R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) > 0$ ; передаварійним – при якому  $R_{\min}(t_k) > 0, R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) = 0$ ; аварійний стан – відмова агрегату, при якому  $R_{\min}(t_k) = 0, R_{3AL}(t_k) = 0$  і  $R_0(t_k) = 0$ . Розглянемо варіанти оцінки прогнозних значень залежно від стану агрегату [2].

**Варіант 1.** Припустимо, що оцінка поточного залишкового ресурсу

обладнання показала, що даний агрегат знаходиться в робочому стані  $R_{\min}(t_k) > 0, R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) > 0$ . В цьому випадку завданням прогнозування є отримання очікуваних прогнозних значень залишкового ресурсу на заданий інтервал часу з оцінкою достовірності отриманих значень.

У роботі прийемо, що оцінювані величини (прогнозовані значення залишкового і узагальненого параметричного ресурсів об'єкту контролю) розподілені згідно гамма-функції, яка є найбільш загальним випадком розподілу випадкових величин. Щільність гамма-розподілу розраховується по формулі [5, 9]:

$$f(R_{3AL}, a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} R_{3AL}^{a-1} \exp\left(-\frac{R_{3AL}}{b}\right) \quad (6)$$

$$a = \frac{M^2}{D}, b = \frac{D}{M}$$

де  $a, b$  – параметр форми масштабу відповідно;  $M, D$  – математичне сподівання і дисперсія оцінки залишкового ресурсу відповідно.

В якості прикладу на рис. 2 наводиться графік оцінки узагальненого параметричного ресурсу турбогенератору з вказаною достовірністю прогнозу настання передаварійного стану.

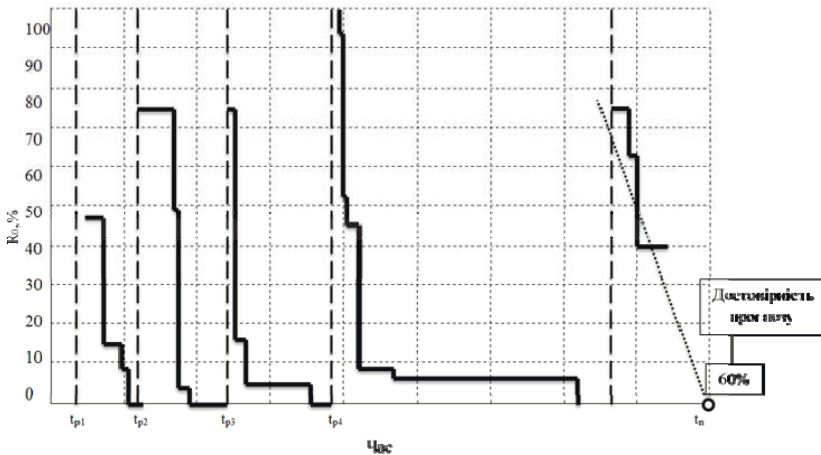


Рис. 2. Прогноз оцінки залишкового ресурсу турбоагрегату :  $t_{pi}$  – час закінчення  $i$ -го ремонту;  $t_n$  – прогнозний час переходу агрегату в передаварійний стан

**Варіант 2.** Припустимо, що оцінка поточного залишкового ресурсу обладнання показала, що даний агрегат вже знаходиться в передаварійному стані  $R_{\min}(t_k) > 0, R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) = 0$ . В цьому випадку завданням прогнозування є оцінка часу до настання аварійного стану. У цій ситуації екстраполяція значень узагальненого ресурсу є прямою лінією з нульовим

значенням ресурсу уздовж осі часу.

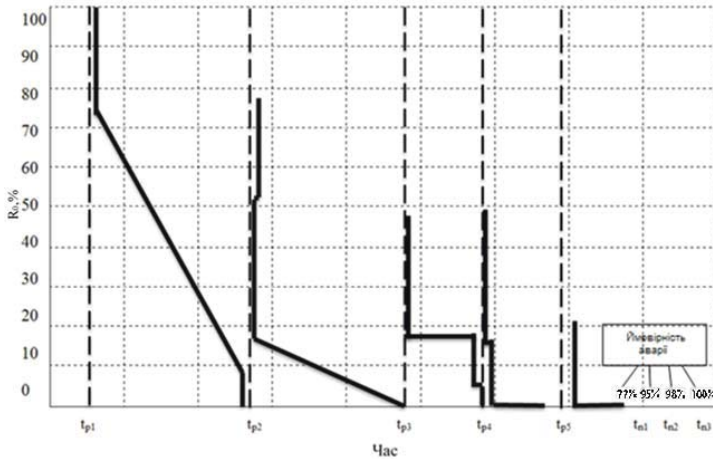


Рис. 3. Прогноз оцінки узагальненого параметричного ресурсу турбогенератора:  $t_{pi}$  – час закінчення  $i$ -го ремонту;  $t_{nj}$  – час  $j$ -ої прогнозованої точки

При цьому визначається ймовірність аварії на контрольованому агрегаті на підставі щільності гама-розподілу (5) тривалості передаварійних станів, виходячи з попередньої статистики роботи енергоагрегату. Як приклад на рис. 3 наводиться графік оцінки узагальненого параметричного ресурсу турбогенератора, що знаходиться в передаварійному стані з вказівкою ймовірності настання аварійної ситуації.

### Алгоритм оперативного розпізнавання передаварійних/аварійних ситуацій на контрольованому обладнанні

Ґрунтуючись на поточних оцінках залишкового і узагальненого параметричного ресурсів контрольованого обладнання, вирішується завдання оперативного розпізнавання передаварійних/аварійних ситуацій на об'єкті контролю. Алгоритм вирішення цієї задачі наступний:

1. Вимірювання і накопичення даних за поточними показниками працездатності агрегату.
2. Використовуючи запроповану методику оперативної оцінки залишкового ресурсу обладнання, оцінити поточні значення залишкового (4) і узагальненого параметричного (1) ресурсів контрольованого агрегату.
3. Оцінити значення критичного ресурсу агрегату по формулі (2).
4. Зіставити отримані поточні значення ресурсів з пороговим рівнем - нулем:

4.1) виконання умов  $R_{\min}(t_k) > 0$ ,  $R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) > 0$  свідчить про нормальний робочий стан контрольованого агрегату;

4.2) виконання умов  $R_{\min}(t_k) > 0, R_{3AL}(t_k) > 0$  і  $R_0(t_k) = 0$  свідчить про передаварійний стан контрольованого агрегату; виноситься рішення про необхідність проведення профілактичних робіт; при цьому необхідно розрахувати ймовірність виникнення аварійної ситуації, ґрунтуючись на статистиці попередньої експлуатації;

4.3) виконання умов  $R_{\min}(t_k) = 0, R_{3AL}(t_k) = 0$  і  $R_0(t_k) = 0$  свідчить про аварійний стан контрольованого агрегату; виноситься рішення про виведення агрегату із експлуатації і проведення ремонтних робіт.

Запропонований алгоритм дозволяє попереджати можливі відмови і непередбачувані аварійні ситуації, що, у свою чергу, сприяє підвищенню надійності і безпеки експлуатації цього обладнання.

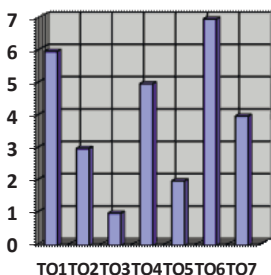
### **Підхід до пріоритетного планування ремонтно-профілактичних робіт**

Слід зазначити, що на практиці при розгляді цілого парку однотипного обладнання і дефіциті ремонтного фонду часто виникає завдання оперативного планування ремонтних робіт, тобто фактично слід визначити необхідність і черговість виводу в ремонт кожного з контрольованих агрегатів [1, 6]. Отримані в результаті розв'язку поставленої задачі об'єктивні значення поточного або прогнозного стану обладнання сприяють вирішенню задачі оперативного планування ремонтних робіт, шляхом встановлення ремонтних пріоритетів, які дозволяють встановити чисельну черговість проведення ремонтно-профілактичних робіт, а аналіз критичного і залишкового ресурсів - необхідність їх проведення на момент прийняття рішення при дефіциті матеріальних ресурсів. Встановлення ремонтних пріоритетів пропонується виконувати, виходячи з напрацьованого залишкового ресурсу контрольованого однотипного обладнання:

$$L_k(t) = (1 - R_{3AL}^k(t)) * 100\% \quad (7)$$

де  $L_k$  – напрацювання залишкового ресурсу  $k$ -го обладнання;  $R_{3AL}^k$  – залишковий ресурс  $k$ -того обладнання на момент прийняття рішення.

Встановлення ремонтних пріоритетів  $P_k(t)$  можна провести шляхом ранжування набутих значень  $L_k(t)$  контрольованого парку однотипного обладнання в порядку спадання і присвоєння кожному з агрегатів відповідного номера (рис. 4). Розглядаючи прогнозні значення узагальнених ресурсів контрольованого обладнання на заданому відрізку часу, механізм встановлення ремонтних пріоритетів аналогічний, але при прийнятті рішення необхідно також враховувати і достовірність отриманого прогнозу. Таким чином, запропонований метод оцінки залишкового ресурсу може бути використаний в завданні оперативного планування ремонтно-профілактичних робіт для різного обладнання промислових підприємств енергетичної інфраструктури (АЕС, ТЕС).



Агрегат	Ремонтний пріоритет
ТО1	2
ТО2	5
ТО3	7
ТО4	3
ТО5	6
ТО6	1
ТО7	4

Рис. 4. Приклад встановлення ремонтних пріоритетів для парку технічних об'єктів (ТО)

### Висновки

В результаті аналізу особливостей експлуатації енергетичного обладнання електричних станцій і мереж багатьох промислових підприємств України було встановлено, що одним з пріоритетних напрямів по підвищенню промислової безпеки є завдання моніторингу і прогнозування поточного технічного стану контролюваного обладнання. Вирішення цієї задачі доцільно здійснювати на основі впровадження автоматизованих інформаційних систем, що здійснюють їх оцінку і прогноз залишкового ресурсу агрегатів за даними експлуатації в реальному часі.

1. *Болотин В.В.* Ресурс машин и конструкций // М.: Машиностроение, 1996. – 448 с.
2. *Надежность технических систем: Справочник / под ред. И.А. Ушакова.* - М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
3. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строку служби) технічних систем. – К.: ІПММС НАНУ. – 2016.
4. *Бабак С.В.* Статистическая диагностика электротехнического оборудования: Монография / С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак // – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
5. *Бабак В.П.* Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика / В.П. Бабак, Б.Г. Марченко, М.Є. Фриз //– К.: Техніка, 2004. – 288 с.
6. *Марченко Н.Б.* Методи оцінювання точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики. Монографія / Н.Б. Марченко, В.В. Нечипорук, О.П. Нечипорук, Ю.В. Пепа // – К.: Вид-во ПВП «Задруга», 2014. – 200 с.
7. *Дьяков А.Ф.* Новые подходы к оценке ресурса стареющего энергооборудования электростанций и модульные принципы создания диагностической аппаратуры/ А.Ф. Дьяков, В.Г. Канцедалов, Г.П. Берлявский, В.Ф. Злепко, Е.А. Гринь //Электрические станции, 2014. – №4. – С.10-18.
8. *Канцедалов В.Г.* Новые аспекты в теории и практике надежности энергооборудования ТЭС, вырабатывающего физический ресурс/ В.Г. Канцедалов, Г.П. Берлявский, В.Ф. Злепко и др. // Электрические станции, 2015. – №3. – С.45-55.
9. *Власов А.Б.* Определение гамма - процентных показателей надёжности контактных соединений на основе тепловизионной диагностики / А.Б. Власов // Промышленная энергетика, 2013. – №2. – С.11.

Поступила 16.10.2017р.