

# НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 620.179

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСУ ОБЛАДНАННЯ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Н. І. Чабан, В. Д. Миндюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506611,  
e-mail: chaban.n11@gmail.com

*Ресурс є найважливішою характеристикою, що визначає тривалість безпечної експлуатації як окремих виробничих об'єктів, так і складних технічних систем. Оцінка ресурсу промислового обладнання, зокрема нафтогазового, – важлива задача, вирішення якої проводиться як на стадії проектування, так і впродовж періоду експлуатації. Тому розроблення нових методів оцінки залишкового ресурсу обладнання тривалої експлуатації є актуальним завданням. В даній роботі проаналізовано основні методи визначення залишкового ресурсу устаткування. Розглянуто ймовірнісні методи визначення ресурсу, а саме: методи визначення ресурсу за індивідуальними кривими втоми, моделі прогнозування залишкового ресурсу з використанням методів аналізу часових рядів, а також параметричні методи. Встановлено, що найбільш перспективним напрямком визначення залишкового ресурсу є використання фізичних уявлень про ресурсні властивості із застосуванням ймовірнісних методів.*

Ключові слова: ресурс, залишковий ресурс, прогнозування, обладнання тривалої експлуатації.

*Ресурс является важнейшей характеристикой, определяющей продолжительность безопасной эксплуатации как отдельных производственных объектов, так и сложных технических систем. Оценка ресурса промышленного оборудования, в том числе нафтогазового, – важная задача, решение которой проводится как на стадии проектирования, так и протяжении периода эксплуатации. Поэтому разработка новых методов оценки остаточного ресурса оборудования длительной эксплуатации является актуальной задачей. В данной работе проанализированы основные методы определения остаточного ресурса оборудования. Рассмотрены вероятностные методы определения ресурса, а именно: методы определения ресурса по индивидуальным кривым усталости, модели прогнозирования остаточного ресурса с использованием методов анализа временных рядов, а также параметрические методы. Установлено, что наиболее перспективным направлением определения остаточного ресурса является использование физических представлений о ресурсных свойствах с применением вероятностных методов.*

Ключевые слова: ресурс, остаточный ресурс, прогнозирование, оборудование длительной эксплуатации.

*The equipment life is an essential characteristic that determines the duration of safe operation of both individual production facilities and complex technical systems. The assessment of industrial equipment life, including oil and gas equipment, is an important task to be solved both at the design stage and during operation. The development of new methods to assess the residual life of long-term operation equipment is an urgent task. This paper analyzed the main methods to determine the residual equipment life were analyzed. Probabilistic methods of the life determination were considered, namely: methods for life determination according to individual fatigue curves, forecast model of the residual life using time-series analysis, as well as parametric methods. It was established that the most promising direction of the residual life determination was application of physical representations about life properties using probabilistic methods.*

Key words: life, residual life, forecast, long-term operation equipment.

### Вступ

Забезпечення технологічної безпеки в основних галузях народного господарства, запобігання виникненню аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру є складовою створення екологічно та техногенно безпечних умов експлуатації обладнання, що є невід'єм-

ною частиною державної політики національної безпеки і державного будівництва.

Аналіз причин виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру за останні роки показав, що майже у половині випадків (48 %) вони мають технічний характер (через незадовільний технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж,

їх значну зношеність унаслідок закінчення нормативного строку експлуатації – нормативно-го ресурсу). За підрахунками спеціалістів, спрацьовання зазначених об'єктів у різних галузях народного господарства становить (50-70)% і має тенденцію до зростання.

Через складний фінансовий стан більшості суб'єктів господарської діяльності, значне здорожчання будівництва і введення в експлуатацію нових об'єктів, високу вартість і трудомісткість їх заміни практично припинилося оновлення основних фондів. Капітальний і поточний ремонт споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж проводяться нерегулярно, внаслідок чого зростає спрацьованість цих об'єктів, ступінь їх небезпеки та ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру, а витрати на аварійно-відновлювані роботи в 2-3 рази перевищують розрахункові витрати на проведення зазначених ремонтів.

Враховуючи наведені фактори, питання управління експлуатаційним строком надійного та безпечного використання обладнання шляхом визначення залишкового ресурсу і встановлення нових термінів експлуатації, що перевищують передбачені проектною та експлуатаційною документацією, а також забезпечення обов'язкових умов його експлуатації в цей період набуває особливої актуальності.

#### **Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій**

Аналізуючи існуючі підходи до оцінки залишкового ресурсу старіючого обладнання, що застосовуються в різних галузях промисловості, можна виділити такі загальні тенденції.

А. А. Дубов у своїй роботі [1] вважає, що необхідно розвивати перехід від імовірнісних методів оцінки ресурсу, заснованих на статистиці відмов, до оцінки індивідуального ресурсу старіючого обладнання на основі комплексного підходу, що поєднує результати руйнівного і неруйнівного контролю з перевірочними розрахунками на міцність. Також при оцінюванні ресурсу помітна тенденція до переходу від дефектоскопії до методів технічної діагностики, заснованих на поєднанні механіки руйнувань, металознавства і неруйнівного контролю (НК). На перший план виходять методи НК напружено-деформованого стану обладнання та конструкцій. Усвідомлено необхідність 100%-го обстеження старіючого обладнання з метою визначення потенційно небезпечних зон.

Однак реалізація вищеперелічених підходів володіє певними недоліками та недоопрацюваннями. Розглянемо далі основні з них.

При комплексному застосуванні різних методів і засобів неруйнівного і руйнівного контролю немає чітко визначеного порядку і послідовності в їх застосуванні для конкретного об'єкта контролю.

Порядок, обсяг та періодичність контролю обладнання, як відомо, визначається, з одного боку, парковим (розрахунковим) ресурсом, пошкоджуваністю, міжремонтним періодом, а, з

іншого – наявністю коштів і методів контролю та їх можливостями.

Тільки в окремих, найбільш відповідальних галузях промисловості (наприклад, атомна і теплова енергетика), існують спеціальні інструкції про порядок і періодичність контролю та продовження терміну служби обладнання [2, 3]. І навіть в цих передових галузях (з точки зору організації контролю за станом металу обладнання) існує проблема визначення граничного стану металу і оцінки індивідуального ресурсу обладнання [4].

Запропоновані методики перевірочного розрахунку на міцність можна умовно поділити на чотири групи:

- методики розрахунку за швидкістю корозії металу;
- методики розрахунку тріщиностійкості металу;
- методики розрахунку на втому металу;
- методики розрахунку вузлів устаткування, що працює в умовах повзучості.

При цьому головне недоопрацювання відомих методик полягає в тому, що вони пропонують низький рівень допустимих напружень  $[\sigma]$ . Як правило, це рівень  $[\sigma] \leq 0,5\sigma_{0,2}$ , де  $\sigma_{0,2}$  – умовна межа плинності металу. Для відповідальних конструкцій існує вимога щодо розрахунків рівня  $[\sigma] < 0,3\sigma_{0,2}$ . Ці вимоги, як відомо, обумовлені роботою металу обладнання в умовах ковзання і зсувної деформації. Як свідчить практика, ці умови роботи металу є визначальними для надійності конструкції. Однак розрахунковими методами неможливо заздалегідь спрогнозувати зону виникнення площин ковзання металу на обладнанні.

Крім того, наявні методики розрахунку на міцність, як правило, припускають незалежне протікання процесів корозії, втоми і повзучості, хоча насправді ці процеси протікають одночасно в випадковому поєднанні.

Тенденція до переходу від традиційної дефектоскопії до технічної діагностики з застосуванням комплексного підходу, що включає: визначення параметрів дефектів, оцінювання розподілу внутрішніх (залишкових) напружень, визначення фактичних структурно-механічних характеристик металу стримується, в першу чергу, через низьку ефективність існуючих методів і засобів контролю напружено-деформованого стану обладнання. Наприклад, в роботі [5] відзначається, що на сучасному етапі жоден з випробуваних засобів визначення напружень газопроводів (було випробувано близько 10 різних засобів вимірювання напружень) в реальних умовах експлуатації не може забезпечити достовірних відомостей про напружено-деформований стан (НДС) труб.

В роботі Комаровського А.А. [6] відзначається, що в основу теорії і прогнозування надійності обладнання повинно бути покладено термодинамічне рівняння стану твердого тіла. Визначено основні фізичні ефекти, що супроводжують механізм руйнування металу: механічні, теплові, ультразвукові, магнітні, електричні і електромагнітні.

Звідси випливає, що, використовуючи одночасно декілька параметрів контролю, які відображають перелічені ефекти, можливо найбільш об'єктивно оцінювати напружено-деформований стан об'єкта контролю.

### Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття

Як бачимо, кожен з наведених способів прогнозування ресурсу обладнання, призначеного для довготривалої експлуатації, володіє певними недоліками і не враховує низки факторів, що суттєво впливають на його ресурс.

Тому невіршеною проблемою залишається розроблення комплексного методу, що враховує фізичні аспекти про ресурсні властивості в комплексі з застосуванням імовірнісних методів.

### Формулювання цілей статті

Метою даної статті є висвітлення сучасних способів визначення ресурсу обладнання довготривалої експлуатації. Основними тенденціями розвитку є дослідження в сфері розробки нових динамічних моделей, що враховують складні багатофакторні фазові і структурні зміни виробу матеріалів тривало експлуатованих конструкцій; створення методик отримання найбільш інформативних ознак виробів з метою подальшого діагностування та оцінювання ймовірності виходу об'єкта з ладу.

### Висвітлення основного матеріалу

Продовження термінів експлуатації устаткування є величезним резервом підвищення ефективності його використання та економії матеріальних ресурсів, але при цьому виникає серйозна проблема – забезпечення надійності та безпеки його подальшої експлуатації.

Визначення залишкового ресурсу обладнання відноситься до класу задач індивідуального прогнозування і включає: оцінку поточного стану і розвиток цього стану в найближчому майбутньому, оцінку ймовірностей настання відмов та прогнозування аварійних ситуацій, оцінку ризику стосовно небезпечних аварійних ситуацій. На основі прогнозу встановлюється гранично допустимий термін експлуатації обладнання або призначається дата проведення чергового контролю його стану.

Основою для прогнозування залишкового ресурсу обладнання слугує така інформація:

- діагностичні дані про стан, дані поточного оперативного контролю в процесі експлуатації;
- дані про навантаження і умови впливу навколишнього середовища;
- апріорна інформація про елементи, що визначають ресурс.

Існують два основних напрямки визначення залишкового ресурсу:

- 1) методи, засновані на фізичних передумовах;
- 2) імовірнісні методи оцінки залишкового ресурсу.

Чисто фізичні методи оцінки залишкового ресурсу, як правило, не враховують реальні умови експлуатації. У зв'язку з цим значення показників ресурсу, розраховані шляхом фізичних передумов, часто у багато разів перевищують значення, отримані шляхом обробки статистичних даних. Застосування імовірнісних методів оцінки залишкового ресурсу вимагає отримання статистичної інформації про ресурс аналізованого устаткування, що ускладнено як економічно, так і в часі. Крім того, потрібно виконання умови статистичної стійкості, що для виробів одиничного виконання є проблематичним.

Найбільш перспективним напрямком визначення залишкового ресурсу є використання фізичних уявлень про ресурсні властивості із застосуванням імовірнісних методів.

Як основні показники залишкового ресурсу прийнято розглядати:

- середній залишковий ресурс  $\pi(t)$ , що є математичним очікуванням залишкового ресурсу після напрацювання  $t$ ;
- гамма-процентний залишковий ресурс  $\pi_\gamma(t)$ , що визначається як напрацювання з деякого моменту часу  $t$ , протягом якого безвідмовно напрацьований об'єкт буде мати значення умовної ймовірності безвідмовної роботи рівня  $\gamma$ :

$$\frac{R[\tau + \pi_\gamma(\tau)]}{R(\tau)} = \gamma. \quad (1)$$

Для порівняння розглянемо такі методи оцінки залишкового ресурсу:

- імовірнісний;
- параметричний (на основі магнітної характеристики металу), а також методи, засновані на використанні:
  - дифузійного розподілу;
  - індивідуальних кривих втоми;
  - аналізу часових рядів.

### Імовірнісні методи розрахунку ресурсу

Імовірнісний метод проілюструємо на прикладі оцінки ресурсу для різних імовірнісних пошкоджень зразків з легкого сплаву АМг-6 і сталі ЕП-630, випробуваних під дією сукупності випадкових процесів різної інтенсивності, що піддаються консольному вигину на електродинамічних установках з автоматичним підтриманням реалізованого випадкового процесу [7, 8].

На основі досліджень ряду сплавів при різних навантаженнях встановлено, що, з точки зору впливу на довговічність, будь-який процес може бути представлений трьома параметрами:

- математичним очікуванням напружень  $\sigma_m$ , що відображає статичне зміщення процесу навантаження об'єкта (наприклад, під дією встановленого вантажу);

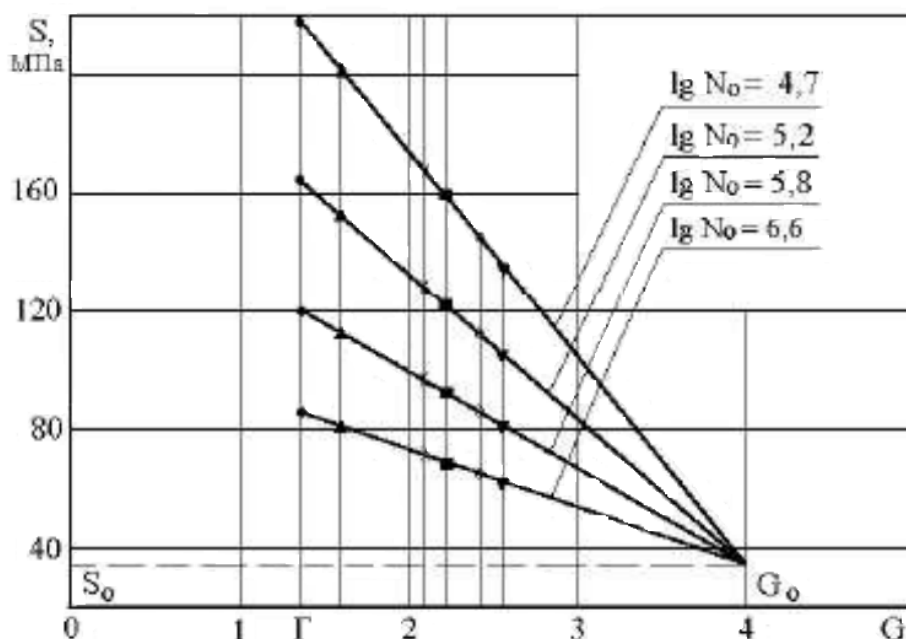


Рисунок 1 – Діаграма характеристик опору втомі зразків зі сплаву АМг-61

- середнім квадратичним відхиленням напружень  $S$ , що характеризує інтенсивність динамічного навантаження;

- параметром структури процесу  $G$ , що інтегрально оцінює розподіл співвідношення ординат і максимумів процесу (рис. 1).

Час впливу на об'єкт є кількістю перетинів центрів процесом нульового рівня із заданим знаком похідної –  $N_0$ . Подаючи випадкові та інші процеси за допомогою зазначених параметрів, можна описати втомну витривалість об'єкта, отриману за різних видів навантажень (гармонічного, полігармонічного, випадкового, змішаного).

Недоліком даного методу є те, що отримання статистичної інформації про ресурс аналізованого устаткування є тривалим і високо-вартісним.

**Параметричні методи оцінки поточного стану та залишкового ресурсу металоконструкцій за методом неруйнівного контролю**

В основу підходу покладено неруйнівний метод поточного контролю (за увесь час експлуатації) за результатами вимірювання такої магнітної характеристики металу, як коерцитивна сила ( $H_c$ ).

Подібний підхід давно визнаний в металургії і машинобудуванні та застосовується при здавальному контролі готової металопродукції за механічними властивостями [9-10].

Крім вихідних положень, береться до уваги й те, що  $H_c$  є однією з найбільш структурночутливих магнітних характеристик металу, тому за результатами вимірювань  $H_c$  можна контролювати механічні властивості не тільки нового металу, але і стежити за динамікою динаміка зміни стану робочого шару впродовж всього терміну експлуатації конструкції. Результати лабораторного контролю  $H_c$  поверхні катання

вибірки прокатних валків протягом терміну їх служби довели, що даний параметр неруйнівного контролю виправдав такі очікування [11].

Групу валків у кількості 60 шт. досліджували протягом півтора року. На робочу поверхню валка наносили координатну сітку з прив'язкою її до конструкції валка для виконання всіх подальших вимірів у одних і тих же точках. Вимірювання виконували ручним портативним магнітним структуроскопом КРМ-Ц-К2М.

Таким чином, при експлуатації коерцитивна сила безпосередньо пов'язана з діючими експлуатаційними напруженнями і накопиченням пошкоджень у металі, які визначають залишковий ресурс конструкції.

Одним з недоліків даного методу вважається неврахування реальних умов експлуатації. У зв'язку з цим значення показників ресурсу, розраховані за допомогою фізичних методів, часто у багато разів перевищують значення, отримані шляхом обробки статистичних даних.

**Метод оцінки ресурсу з використанням дифузійного розподілу**

Останнім часом за теоретичну модель розподілу відмов механічних виробів все частіше обирають дифузійний монотонний розподіл (DM-розподіл) [12].

Так, за відомою початковою функцією розподілу ресурсу досліджуваних виробів  $F(t)$  (або щільністю розподілу ресурсів  $f(t)$ ) можна визначити значення характеристик залишкового ресурсу.

Для розрахунку щільності DM-розподілу використовують формулу:

$$f(t) = \frac{t + \mu}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2v^2\mu t}\right], \quad (2)$$

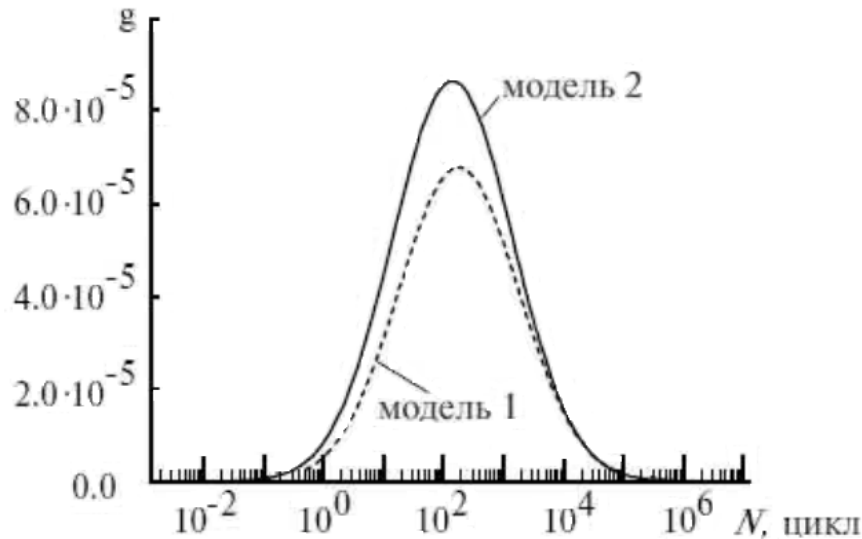


Рисунок 2 – Щільність розподілу ресурсу елемента металокопструкції

де  $\mu$  – параметр масштабу, який збігається зі значенням медіани розподілу;

$v$  – параметр форми, який відповідає з коефіцієнту варіації розподілу.

Функція DM-розподілу дорівнює:

$$F(t) = DM(t; \mu; v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right). \quad (3)$$

Імовірність безвідмовної роботи  $R(t)$  визначається з наступних співвідношень:

$$R(t) = 1 - DM(t; \mu; v) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right). \quad (4)$$

Використовуючи відомий вираз щільності розподілу залишкового напрацювання [13], отримуємо математичне очікування залишкового ресурсу після моменту  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \pi(\tau) = & \left\{ \left[ \mu \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{v\sqrt{\mu \tau}}\right) + \right. \\ & \left. + \frac{\mu v^2}{2} e^{2v-2} \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu \tau}}\right) + \frac{v\sqrt{\mu \tau}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - \mu)^2}{2t^2 \mu \tau}\right) \right\} \times \\ & \times \left\{ \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{v\sqrt{\mu \tau}}\right) \right\}^{-1}. \quad (5) \end{aligned}$$

До недоліків даного методу можна віднести те, що необхідно знати початкову функцію розподілу ресурсу досліджуваних виробів, а також складність розрахунків.

#### Методи визначення розподілів ресурсу за індивідуальними кривими втоми

Одним з можливих способів розрахунку розподілу ресурсу є використання індивідуальних кривих втоми (ІКВ) у вигляді квантилів відповідних значень ймовірностей [13, 14].

Можливі два підходи до побудови ІКВ: прямий і зворотний. Прямий підхід полягає в знаходженні розподілу ресурсу і визначенні дійсної поведінки зразків на основі цих розподілів. Існує і зворотний підхід до моделювання втомної довговічності. Якщо дані розподілу ресурсу отримані на основі випробувань, необхідно знайти випадкові об'єкти, відповідальні за втомну поведінку зразків.

Як приклад розрахунку втомної довговічності розглянемо процес навантаження елемента металокопструкції в опорах козлового крана, отриманий при натурному тензометруванні, гістограма амплітуд якого оброблена за методом «дощу» і апроксимована розподілом Вейбула з параметрами масштабу  $\mu = 67,6$  і форми  $\varphi = 2,2$ .

На рисунку 2 зображено характеристичні функції для моделі 1 (межа витривалості  $\sigma = 32,5$  МПа) і моделі 2 (змінний поріг витривалості).

Модель з нульовим лімітом витривалості не розглядається через її малу придатність. Відзначимо, що для моделі 2 необхідно виконати обмеження справа діапазону для урахування можливої зміни випадкової величини  $N$  значенням  $N_0 = 2 \cdot 10^6$ . Якщо ж щільність розподілу зміститься вниз по осі  $S$  (тобто амплітуди навантаження будуть меншими, ніж в даному випадку), то щільність розподілу зміститься вправо, обмеженість розподілу ресурсу буде проявлятися більш явно і її відмінність від нормального розподілу стане більш різкою.

Прогнозування розподілу залишкового ресурсу також ґрунтується на фундаментальному припущенні про наявність у кожного зразка своєї ІКВ (індивідуальна крива втоми) і, крім того, на апостеріорній інформації про те, що до моменту прогнозування при заданій історії навантаження  $N$  досліджуваного зразка його руйнування не сталося. Тоді, якщо відома історія навантаження, можна виділити у всьому просторі ІКВ безліч кривих, які не реалізувалися при заданій історії навантаження, а, отже, і обчислити апостеріорні розподіли значень ресурсу.

Розглянемо детермінований варіант прогнозування залишкового ресурсу  $N_{res}$  для випадку двоступеневого стаціонарного навантаження: спочатку зразок навантажують протягом  $n_1$  циклів з амплітудою  $S_1$ , а потім доводять до руйнування при навантаженні з амплітудою  $S_2$ .

Залишковий ресурс визначають зі співвідношення:

$$N_{res} = N_2 \left( 1 - \frac{n_1}{N_1} \right), \quad (6)$$

де  $N_1 = N(S_1)$  і  $N_2 = N(S_2)$ .

Наведена модель накопичення пошкоджень, вихідні дані про втому і спосіб прогнозування ресурсу є взаємопов'язаними елементами замкненої моделі надійності елемента за критерієм втомної довговічності. У разі нестаціонарного навантаження з більш складною історією навантаження необхідна більш трудомістка процедура обчислення розподілів залишкового ресурсу із залученням розподілів величини накопиченого пошкодження, що можна віднести до недоліків даного методу. Також для його використання необхідна наявність індивідуальних кривих втоми для кожного об'єкта.

#### **Моделі прогнозування залишкового ресурсу з використанням методів аналізу часових рядів**

Під часовим рядом розумітимемо безліч значень ресурсу, зафіксованих в певний час. Подібні ряди дуже часто формуються для контролю технологічного процесу, обліку ресурсних витрат тощо. Моделі, в основі яких лежить використання даних часових рядів (або часових серій), дозволяють здійснити прогнозування фіксованих значень у найближчому майбутньому. Побудова таких моделей здійснюється у два етапи [16, 17]:

1) аналіз внутрішньої структури даних і пошук кількісних і якісних тенденцій. Зазвичай на цьому етапі відбувається непрямий поділ вихідних даних на систематичний (прогнозований) і випадковий (не піддається прогнозу) компоненти;

2) побудова моделі і прогнозування.

Існують два підходи до створення моделей:

- За статичними методами прогнозування оцінюють тенденції, які формують систематичний компонент, тільки один раз – на початковій стадії аналізу даних. Відтак вважають його статичним і незмінним. Дані методи всі майбутні помилки прогнозування розглядаються як випадковий компонент.

- Адаптивні методи прогнозу коригують оцінки, отримані на першому етапі дослідження після кожного нового спостереження. Методи, що належать до даної категорії, припускають, що частина помилок прогнозування, які виникають внаслідок неправильного формування систематичного компонента на попередніх кроках, може бути усунена.

Наведемо алгоритм роботи адаптивного методу аналізу часових рядів для прогнозування залишкового ресурсу [17].

1. Ініціалізація – проводяться аналіз внутрішньої структури даних і пошук кількісних та якісних тенденцій. Поділ вихідних даних на систематичний (прогнозований) і випадковий (не піддається прогнозуванню) компоненти.

2. Прогнозування – передбачення значення ресурсу на момент часу  $t+1$  з урахуванням значень ресурсу для моментів часу  $t$ , де  $t = 0, 1, \dots, n$ .

3. Обчислення помилки прогнозування. За помилку прогнозування допустимо приймати абсолютну різницю між дійсним значенням ресурсу на момент часу  $t+1$  і прогнозованим.

4. Модифікація – зміна оцінок, отриманих на першому етапі (перегляд показників) для моменту часу  $t+1$  з урахуванням отриманої помилки прогнозування і з метою зниження абсолютного значення помилки.

Модифікований прогноз на наступних етапах використовується для прогнозування значень ресурсу в момент часу  $t+2$ .

Кроки 2, 3 і 4 повторюються до тих пір, поки не буде проаналізовано весь наявний часовий ряд. Остання оцінка (для моменту часу  $t = n$ ) використовується для прогнозування майбутніх значень ресурсу.

Перевага методів аналізу часових рядів полягає в простоті їх використання, а також в швидкому отриманні результату.

На даному етапі такі методи широко застосовуються для прогнозування ринку продажів, при бюджетному аналізі, проектуванні та впровадженні технологій на виробництві.

Недоліком вказаних методів є можливість отримувати задовільний прогноз тільки для відносно «стабільних» даних, не схильних до різкої зміни.

#### **Висновки**

Проведений аналіз методів оцінки залишкового ресурсу та їх недоліків показав доцільність подальшого удосконалення методик більш точного виявлення пошкоджень (деградації) конструкцій на ранній стадії експлуатації. Оцінка залишкового ресурсу при використанні таких методик характеризується застосуванням великої кількості багатофакторних залежностей. Таким чином, актуальними є: розробка нових динамічних моделей, що враховують складні багатофакторні фазові і структурні зміни виробництва матеріалів тривало експлуатованих конструкцій; створення методик отримання найбільш інформативних ознак з метою подальшого діагностування та оцінювання ймовірності виходу об'єкта з ладу.

## Література

- 1 Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Методы контроля и диагностики. – 2012. – № 3. – С. 74-78.
- 2 РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: ОРГРЭС, 2003.
- 3 РД ЭО 1.1.2.09.0774-2009 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов, сосудов и насосов энергоблоков АЭС. – М.: Концерн "Росэнергоатом", 2009. – 75 с.
- 4 Концепция технического перевооружения энергообъектов электростанций РАО "ЕЭС России" в период до 2015 года // Документ РАО "ЕЭС России". – Москва, ноябрь, 2001.
- 5 Дубов А.А. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов / А.А. Дубов, Е.А. Демин, А.И. Миляев, О.И. Стеклов // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 58-61.
- 6 Комаровский А.А. Диагностика напряженно-деформированного состояния / А. А. Комаровський // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 2. – С. 22-27.
- 7 Бородин Н.А. Проблемы и методы оценки сопротивления металлических материалов многоциклового усталости и длительному статическому разрушению / Н.А. Бородин, С.П. Борисов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – № 1. – С. 89-93.
- 8 ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – Введ. 01.01.98. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 58 с.
- 9 Горецкий В.М. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла / В.М. Горецкий, А.А. Дубов, Е.А. Демин // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 3. – С. 23-26.
- 10 Хапонен Н.А. Перспективы развития неразрушающего контроля / Н.А. Хапонен, Г.П. Иванов, А.А. Худошин // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 1. – С. 48-50.
- 11 Оценка текущего состояния и остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужичкий, Л.А. Крутикова [и др.] // Специальные научные разработки. – 2003. – № 2. – С. 31-33.
- 12 Стрельников В.П. Определение ожидаемой остаточной наработки при ДМ-распределении / В.П. Стрельников // Математичні машини і системи. – 2000. – № 1. – С. 94-100.
- 13 Изерманн Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение / Р. Изерманн // Приборы и системы управления. – 1998. – № 4. – С. 56-70.
- 14 Анализ применимости уравнений и исследование формы кривой усталости / Ю.С. Борисов, Ю.Н. Благовещенский, С.С. Дмитриченко [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – № 10. – С. 41-52.
- 15 Kopnov V.A. Residual life, linear fatigue damage accumulation and optimal stopping / V.A. Kopnov // Reliability Engineering and System Safety. – 1993. – No 40. – P. 319 – 325.
- 16 Chopra S. Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation / S. Chopra, P. Meindl // Prentice-Hall. – 2004. – N 2. – С. 40 – 44.
- 17 Chen H.M. Multiscale forecasting method using armax models / H.M. Chen., B. Vidakovic, N.D. Mavris // Technological Forecasting and Social Change. – 2004. – N 1. – P. 34 – 39.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*13.11.17*

*Рекомендована до друку*

*професором Карнашем М.О.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*канд. техн. наук Тацаковичем Н.Л.*

*(ТОВ НВФ «Зонд», м. Івано-Франківськ)*