

УДК 62-192:52

**С. Білодіденко, докт. техн. наук; Г. Біліченко;  
В. Гануш; А. Попов**

*Національна металургійна академія України*

## **ОСНОВИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА КОНТРОЛЕМ БЕЗПЕКИ**

*Резюме.* За концепцією прийняттого ризику розроблено ресурсні моделі безпеки. Прогнозування технічного стану оцінюється за індексом безпеки, що лінійно змінюється з плином часу. Як результат, запропоновано стратегію технічного обслуговування та ремонту технологічного обладнання за контролем рівня безпеки. Ефективність діагностичних алгоритмів продемонстровано на прикладі киснево-конверторних фурм.

*Ключові слова:* технічний стан, діагностика, ризик, безпека, металургійне обладнання.

**S. Belodedenko, G. Bilichenko, V. Ganush, A. Popov**

## **FUNDAMENTALS MAINTENANCE OF MECHANICAL SYSTEMS BY MEANS OF SAFETY CONTROL**

*The summary.* Based on the concept of acceptable risk is developed the resource model of safety. Prediction of technical condition is estimated by means a linear change with time of index safety. As a result, is proposed a strategy of maintenance and repair of process equipment by control the safety level. The effectiveness of diagnostic algorithms demonstrated by example the oxygen-converter tuyeres.

*Key words:* technical condition, diagnostic, risk, safety, metallurgical equipment.

**Постановка проблеми.** Система технічного обслуговування та ремонту технологічного устаткування регламентується стратегією його використання. Відомі три принципово різні стратегії, що дозволяють використовувати обладнання: 1) до нормативного ресурсу; 2) до передвідмовного стану; 3) до відмови. Їхній розвиток зумовлений конфліктом між такими показниками надійності, як коефіцієнт готовності обладнання та ступенем вироблення його ресурсу. Якщо в першій з наведених стратегій гарантується підтримка високого коефіцієнта готовності, то в інших забезпечується повний або практично повний виробіток ресурсу. Наведені протиріччя вирішуються шляхом застосування методів технічної діагностики. Без неї обходяться лише у двох крайніх проявах стратегій використання і технічного обслуговування (ТО): аварійного відновлення або профілактичної заміни. Хоча вибір на користь тієї чи іншої стратегії здійснюється на підставі критерію мінімізації витрат на ТО [1], насправді обидві стратегії вигідні для дуже обмеженого кола ситуацій. Аварійне відновлення як система ефективна лише для недорогих вузлів з коротким часом заміни. Профілактична заміна вузлів доцільна в особливо небезпечних виробництвах, де збиток від аварій значно вище вартості вузла.

Прагнення підвищувати ефективність ТО за рахунок зниження складських запасів змінних деталей змушує ширше використовувати діагностування технічного стану обладнання. Така тенденція веде до впровадження різних варіантів системи обслуговування за технічним станом. Серед них відомі системи обслуговування з контролем параметрів, а також з контролем надійності. Остання є універсальнішою, однак вона розроблена для ТО однотипних виробів. Отже, цей варіант ТО не годиться для базових елементів конструкцій і відповідальних деталей унікального технологічного устаткування промислових виробництв. Для таких об'єктів доцільно

застосовувати систему ТО з контролем безпеки, підходи до побудови якої наведено в роботах авторів [2,3].

**Метою цих розробок** є пошук показника технічного стану (ТС), однаково чутливого до напрацювання на всіх її періодах, за допомогою якого можливо прогнозувати працездатні стани простих і складних технічних систем, що піддаються механічним пошкодженням.

**Аналіз моделей надійності та безпеки в аспекті контролю технічного стану (огляд досліджень та стан проблеми).** Для кількісної оцінки надійності більшість фахівців використовують ймовірність безвідмовної роботи (ВБР), яка при деяких припущеннях може характеризувати також безпеку  $R$  [2]. Зміну ВБР в часі зазвичай називають функцією надійності чи безпеки  $R(t)$ , яка спільно з алгоритмом її знаходження, що враховує кількість і вид відмов, утворює відповідну модель.

Процес експлуатації характеризується часом наробітку  $t_{\Sigma}$  або числом циклів наробітку  $n_{\Sigma}$ , що веде до накопичення пошкоджень, мірою яких зазвичай виступає відносна довговічність:  $a = t_{\Sigma} / T = n_{\Sigma} / N$ . Для оцінювання ТС ВБР повинна бути чутлива до цього показника.

Найчастіше функція надійності представляється експоненціальним рівнянням  $R_d = \exp(-a)$  (основне рівняння надійності за І. А. Біргером). Воно досить чутливе до наробітку (рис.1а), але дає розбіжність з експериментальною функцією розподілу довговічностей (ФРД). Зокрема, найбільш надійним, але й найменш трудомістким є визначення середньої величини ресурсу  $T$ , яка повинна відповідати ВБР= 0,5. Але основне рівняння обчислює консервативніший результат (табл. 1). Це прийнятно для стадії проектування, але не годиться для контролю роботоспроможності. Крім цього, даний метод не враховує розсіювання ресурсу (тобто має детермінований характер) і має «математичне» походження, він не пов'язаний з природою деградаційних процесів.

У зв'язку з цим функцію надійності чи безпеки отримують не тільки за наведеним методом потоку відмов, а також методом екстраполяції експериментально обґрунтованої ФРД в область крайніх ймовірностей. Отримана таким методом з ФРД нормального типу шукана функція  $R(t)$ , будучи оберненою до ФРД, є малочутливою до наробітку та накопичення пошкоджень, залишаючись, практично горизонтальною на 3/4 періоду експлуатації (рис.1а, лінія  $T(R)$ ). Це робить її непридатною як діагностичний показник.

Спроби удосконалити метод потоку відмов, поширивши експоненційний закон надійності на ситуації з випадковим характером моделей навантаження і міцності, коли  $R_r = \exp[-a(1-R_0)]$  (при цьому  $R_0$ -ВБР для раптової відмови), спрямовують функцію надійності в горизонтальний стан (табл.1).

Таблиця 1. Зміни ВБР під час експлуатації, отримані за різноманітними моделями

$a$	$R_d$	$R_r (R_0=0,9)$	$R_{W10}$	$R_{W20}$
0,25	0,779	0,975	~1	0,9999
0,50	0,607	0,951	0,9999	0,993
0,75	0,472	0,927	0,985	0,903
1,00	0,368	0,905	0,520	0,519

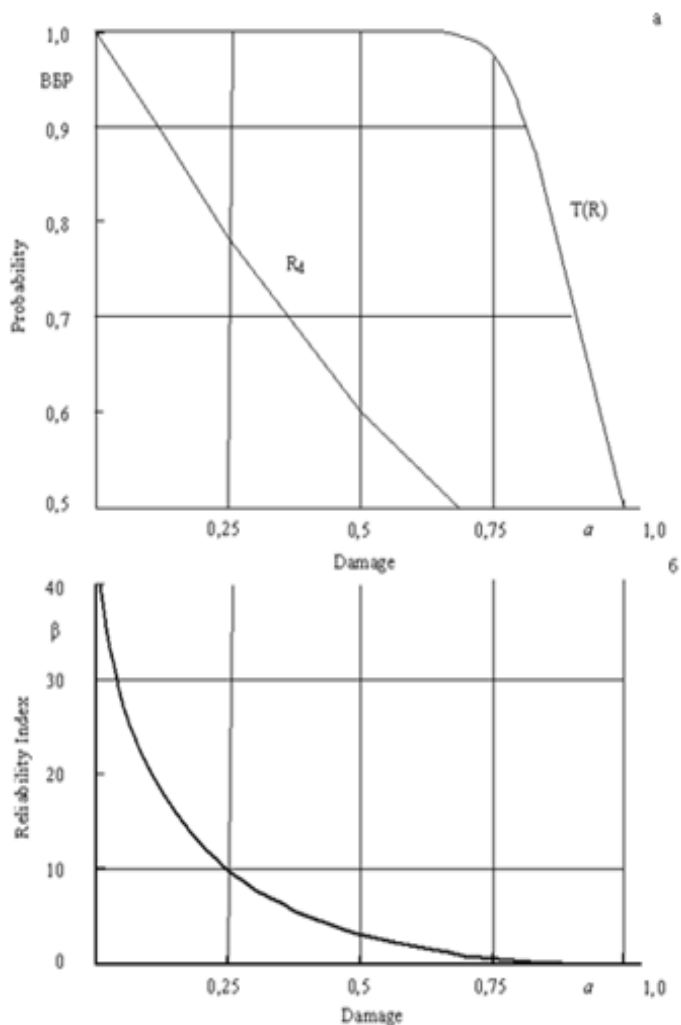


Рисунок 1. Зв'язок між ВБР і накопиченим пошкодженням у вигляді відносного наробітку  $a = t/T$ , отримані за рівнянням надійності  $R_d$  та за ФРД  $T(R)$  нормального вигляду (а), а також зміна індексу надійності  $\beta$  при поступовій відмові (б) [4]

Більш обґрунтовано використовувати для апроксимації розподілу довговічностей інший закон, наприклад, Вейбулла, який після його адаптації для застосовуваних координат має виглядає

$$R_{W10} = \exp\left[-(0.967 \cdot a)^{12.95}\right] \quad (1)$$

$$R_{W20} = \exp\left[-(0.936 \cdot a)^{6.475}\right] \quad (2)$$

Вирази (1) і (2) отримані для коефіцієнтів варіації ресурсу, відповідно  $v_T = 0.1$  і  $v_T=0.2$ . Однак і в цьому випадку метод знаходження функцій  $R(t)$  за ФРД не позбавляє функцію надійності від нестачі чутливості до наробітку (табл.1). Щоб скасувати цей недолік, використовують поняття індексу надійності як функції часу (рис.1б) [4]

$$\beta = \Phi^{-1} \cdot (1 - P_f) = \Phi^{-1} \cdot (R), \quad (3)$$

де  $\Phi$  – функція Лапласа, а  $P_f$  – ймовірність відмови.

Індекс  $\beta$ , по суті, є нормованим квантилем нормального розподілення  $u_R$  і не віддзеркалює фізичну природу відмови.

Відомо, що трактування надійності чи безпеки як ймовірнісної міцності коректне при раптових відмовах і не є такою при відмовах поступового типу [2]. Для

подолання цієї колізії використовують ресурсний підхід [5, 6]. Наприклад, Корнелл представляє індекс безпеки як [5]

$$\beta = (\ln T - \ln t) / S_{\ln T}, \quad (4)$$

де  $T$  и  $t$  – відповідно, середня довговічність та поточний наробіток;  $S_{\ln T}$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ) величини  $\ln T$ .

СКВ  $S_{\ln T}$  визначається з урахуванням варіацій граничного пошкодження, параметра кривої втоми та еквівалентної напруги для випадкового режиму навантаження. Тоді за аналогією з (3) ймовірність відмови поступового типу буде  $P_f = \Phi(-\beta)$ .

Індекси надійності й безпеки можуть характеризувати ТС у процесі експлуатації, оскільки чутливіші до накопичення пошкоджень та напрацювання, ніж власне ВБР. Проте індекс надійності (3) має міцнісно-силове трактування, а індекс безпеки Корнелла (4) має ресурсно-втомне трактування. Тому складно за їх допомогою порівнювати водночас небезпеку від раптових та поступових відмов. Крім того, алгоритм пошуку розподілу величини  $\ln T$  [5] зайве консервативний, що не дає можливості уточнювати ресурс при експлуатації.

**Концепція прийнятного ризику та ресурсна модель безпеки**, на якій базується теорія безпеки промислових об'єктів, передбачає поетапне перепризначення термінів служби: від проектного до первісного, і далі – до залишкових ресурсів. Принципово важливим є положення, що залишковий ресурс повинен визначатися з більш високою науково-методичної точністю, ніж проектний і первісний [7]. Ідентифікація моделі деградації технічного стану механічної системи дозволяє уточнити остаточний ресурс і тим самим підвищити безпеку експлуатації [6].

У системі обслуговування за технічним станом з контролем безпеки використовується концепція прийнятного ризику. Для певного елемента механічної системи на підставі допустимих у галузі втрат за час експлуатації у вигляді прийнятного ризику  $[\rho]$  й інтенсивності втрат від відмови даного елемента  $I_i$ , що має розмірність [збиток / аварія] і показує значущість елемента, встановлюється необхідний рівень безпеки

$$[R_i] = 1 - [\rho] / I_i. \quad (5)$$

Цей рівень можна і безпосередньо призначити як необхідну ВБР, або ж знаходити з оптимальних ризиків і термінів експлуатації [8]. При оцінюванні ВБР за допомогою порівняння пари «напрацювання  $t$  - ресурс  $T$ » інформативний зміст має гарантований запас довговічності  $n_{NR}$ , як відношення мінімального ресурсу  $T_{1-R}$  для ймовірності руйнування  $P_f = 1 - R$  до максимально можливого напрацювання  $t_R$ . Використовуючи логарифмічні координати, визначаємо індекс безпеки як логарифм гарантованого ресурсу (рис. 2)

$$\begin{aligned} \beta_R &= \lg n_{NR} = \lg \frac{T_{1-R}}{t_R} = \lg T_{1-R} - \lg t_R = \lg n_{O(1-R)} - \lg n_{\Sigma R} = \\ &= \overline{\lg T} (1 - u_R \cdot v_{\lg T}) - \lg(t + u_R \cdot v_t) = \overline{\lg n_O} (1 - u_R \cdot v_{\lg n_O}) - \lg(n_{\Sigma} + u_R \cdot v_{\Sigma}), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $n_O$  и  $n_{\Sigma}$  – число циклів навантаження, відповідне ресурсу  $T$  та наробітку  $t$ ;  $v_{\lg T} = v_{\lg n_O}$  и  $v_t = v_{n_{\Sigma}}$  – коефіцієнти варіації, відповідно ресурсу та наробітку.

На початку експлуатації, коли напрацювання  $t_0 = 0$ , індекс безпеки максимальний і дорівнює  $\beta_{R0} = \lg T_{1-R}$ . Графік функції безпеки  $\beta_R(t)$  у логарифмічних координатах

представляє пряму з нахилом під  $45^{\circ}$ , яка чутлива до напрацювання. Тому індекс безпеки зручний у якості інформативної характеристики технічного стану і до значень  $\beta_R \approx 0$  гарантує безпечну експлуатацію. При  $\beta_R \leq 0$  об'єкт потрапляє в зону ризику, його функцією безпеки стає функція розподілу терміну служби (рис. 2) і слід розробляти глибший план діагностики.

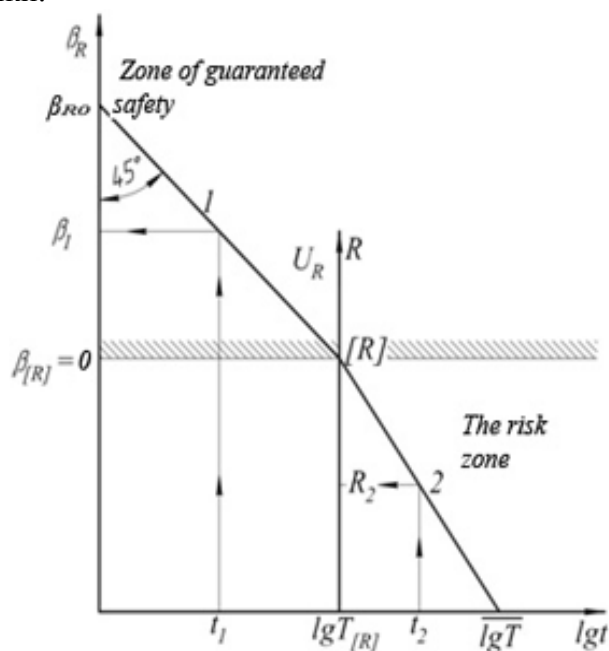


Рисунок 2. Схема оцінювання показників безпеки при контролі технічного стану під час  $t_1$  та  $t_2$  за функціями індексу безпеки 1 та розподілу терміну служби 2

Для оцінювання ТС шляхом контролю величини  $\beta_R$  потрібно знати ФРД і коефіцієнт варіації напрацювання  $v_i$ . Під час контролю  $t_i$ , відклавши по осі абсцис величину  $lg(t_i + u_R \cdot v_i)$ , за графіком  $\beta_R(t)$  отримуємо поточне значення індексу безпеки. Його зменшення пропорційне гарантованому наробітку.

Під впливом дій ремонтно-технічного обслуговування хід графіка  $\beta_R(t)$  стрибкоподібно змінюється. При поетапному переоцінюванні ресурсу за рахунок його уточнювання зниження функції безпеки  $\beta_R(t)$  відбувається не настільки інтенсивно, як при попереджувальній заміні елемента [3]. Для базових і відповідальних елементів механічної системи переоцінювання ресурсу (контроль ТС), очевидно, дешевше, ніж їх заміна. Встановлено, що зі зменшенням інтервалу між контролями зменшується варіація інтенсивності деградаційних процесів, що на графіку  $\beta_R(t)$  відображається як збільшення частоти і зниження амплітуди стрибків [3, 6]. Теоретично можна припустити, що при суцільному моніторингу навантаження лінія  $\beta_R(t)$  буде зростати.

На практиці підтримання безпеки здійснюється, насамперед, через контроль її індексу. Для уповільнення процесу втрати роботоспроможності, у якому є реальний і квазіреальний (детермінований і статистичний) компонент, ремонт та діагностика виступають нарівні. Однак при другому способі вище ступінь виробітку ресурсу, який обернено пропорційний гарантованому запасу довговічності й визначається через індекс безпеки як  $r_R = I_0 \cdot \beta_R$ .

При  $\beta_R = 0$  елемент механічної системи слід знімати з експлуатації. Після цього залишається невикористаною деяка «ризикована» частина ресурсу. При цьому ступінь його вироблення визначається за допомогою ФРД

$$r = 1 - u_{[R]} \cdot v_{lgT} \cdot \quad (7)$$

Ступінь вироблення середнього ресурсу буде вище, якщо знижувати рівень безпеки  $[R]$  і збільшувати термін служби (при цьому зменшується величина  $v_{lgT}$ ). Практично, використовуючи контроль індексу безпеки  $\beta_R$ , величина  $r$  досягає 90%. Таким чином, інформація про роботу устаткування стає нарівні з матеріальними ресурсами, реальним фактором виробництва, що впливає на його ефективність.

**Безпека систем елементів та пошкоджуючих процесів.** Розглянута концепція контролю ТС за допомогою індексу безпеки використовує принцип «слабкої ланки», який придатний для простих технічних систем. Для них відмова (руйнування) елемента  $i$  веде до втрати працездатності (ефективності) всієї системи. Реальні механічні системи технологічного обладнання не завжди вдається представити як прості, оскільки в ньому є ряд відповідальних деталей, що піддаються впливу кількох пошкоджуючих процесів  $j$ . Тому при моніторингу ТС виникає необхідність переходу від окремих показників ризику – безпеки  $\rho_{ij}$ ,  $R_{ij}$  до узагальнених ризиків  $\rho_\Sigma$  та рівнів безпеки  $R_\Sigma$  системи.

При взаємозалежних пошкоджуючих процесах необхідно отримати модель довговічності (ресурсу)  $T_\Sigma$  для сумісної їх дії, після чого для оцінювання індексу безпеки  $\beta_{Rj}$  і ВБР  $R_j$  слід використовувати ФРД  $T_\Sigma(R)$ . При незалежності дії пошкоджуючих процесів або стану елементів ВБР (безпека) системи оцінюється за правилом добутку:  $R_\Sigma = \prod R_{ij}$ . Загальновідомий недолік цього правила пов'язаний з необґрунтовано низькою оцінкою за його допомогою надійності системи при зростанні числа елементів  $i$  та  $j$ . Деяким чином стримує непідтверджене практикою падіння величини  $R_\Sigma$  використання для її обчислення так званого рівняння ланцюга  $R_\Sigma^{-1} = \sum (R_{ij})^{-1} - (n-1)$  (де  $n$  – число елементів  $i$  та  $j$ ), справедливого для простих технічних систем. Одна з причин такого протиріччя полягає в ігноруванні фактичної взаємозалежності елементів.

Використовуючи коефіцієнт взаємозалежності елементів  $Z_n$ , запропоновано визначати ВБР системи як [9]

$$R_\Sigma = \prod R_{ij} + Z_n \cdot [\min R_{ij} - \prod R_{ij}] \quad (8)$$

Якщо перший доданок у цьому рівнянні падає зі зростанням  $n$ , то другий, навпаки, зростає, оскільки зростає і  $Z_n$ . Це утримує  $R_\Sigma$  приблизно на одному рівні. Щоб подолати розглянутий парадокс (термін Е. С. Переверзева), необхідно оцінювати надійність всього об'єкта в цілому, не поділяючи його на елементи [9]. Для цього слід робити випробування всієї конструкції, що не завжди економічно доцільно. Крім цього, необхідно шукати специфічні діагностичні ознаки. Це обмежує використання стратегії технічного обслуговування з контролем надійності на однотипні вироби, для яких є отримані за аналогами характеристики надійності систем.

**Показник ризику для систем.** Оцінити стан складних і простих систем за показниками окремих їх елементів дозволяє ризик-аналіз. У загальному вигляді ризик системи  $\rho_\Sigma$  можна визначити за формулою повної ймовірності  $\rho_\Sigma = \sum \rho_{ij} \cdot U_{ij}$ , де  $\rho_{ij} = 1 - \text{ВБР}_{ij}$  – ймовірність відмови (ризик)  $i$ -го елемента, що має сенс частоти аварій, а  $U_{ij}$  – якийсь рівень значущості [10]. Якщо  $U_{ij}$  виразити через натуральний збиток, то даний вираз представляє канонічне трактування ризику, вимірюваного через збитки в одиницю часу (5).

Для функції надійності експоненціального виду в області високих вірогідностей  $\text{ВБР} = \exp(-a) \approx 1 - a$ , звідки впливає, що  $a_{ij} = \rho_{ij}$ , тобто накопичене пошкодження цілком характеризує ризик експлуатації і втрату працездатності. Тоді можливо визначати ризик системи, як  $\rho_\Sigma = \sum a_{ij} \cdot U_{ij}$ . Оскільки  $a_{ij}$  змінюється з часом напруження, то подібно змінюється і величина  $\rho_\Sigma$ .

Щоб уникнути обчислення збитків у натуральних одиницях, зручно використовувати для  $U_{ij}$  відносні величини. Застосовуючи в цій якості відношення безумовної ефективності до ефективності ідеальної машини, визначають надійність складної технічної системи [10]. Таким чином, вирішується протиріччя, властиве правилу  $PR_{ij}$ , оскільки тоді коефіцієнт  $U_{ij}$  характеризує вже систему в цілому, але ймовірність відмови  $\rho_{ij}$  відноситься до окремого елемента.

У практиці забезпечення надійності відома процедура аналізу наслідків відмов FMEA [10], в якій критичність відмови елемента  $C_{ij}$  оцінюється в балах. Тоді значущість  $U_{ij}$  визначається через відносну критичність відмови  $U_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum C_{ij}} = c_{ij}$ .

Знаючи частку відмов відповідної категорії тяжкості в можливих відмовах системи  $\pi_{ij}$ , рівень значимості обчислюють, як  $U_{ij} = c_i \cdot \pi_{ij}$ . Тоді  $\rho_{\Sigma} = \sum c_i \cdot \pi_{ij} \cdot a_{ij}$  [10].

Якщо використовувати ресурсну модель для визначення ВБР [2], то в ній автоматично враховується «часовий» фактор експлуатації, і необхідність контролю накопиченого пошкодження  $a_{ij}$  відпадає. Тоді для ФРД логнормального виду  $\lg T_p$  і для нормального закону розподілу часу напрацювання  $t_p$  ризик системи з достатньою точністю можна визначити як

$$\rho_{\Sigma} = \sum \left\{ \left[ 1 - \Phi \left( \frac{\overline{\lg T_{ij}} - \overline{\lg t_{ij}}}{S_{\lg T_{ij}} - 0.43 \cdot v_{ij}} \right) \cdot U_{ij} \right] \right\}, \quad (9)$$

де  $\lg T_{ij}$  і  $\lg t_{ij}$  – відповідно, середній логарифм ресурсу і логарифм середнього наробітку для елемента  $i$  та пошкоджуючого процесу  $j$ ;  $S$  і  $v$  – відповідно, СКВ ресурсу і коефіцієнт варіації наробітку.

При викладених методах оцінювання ризику з урахуванням потенційного збитку можливі складності з обґрунтуванням граничної величини  $[\rho_{\Sigma}]$ . Якщо невідомо її значення, неможливо діагностувати роботоспроможні стани. Об'єктивніше оперувати з частотною складовою ризику  $\rho_i$ . Такою оперативною характеристикою ризику виступає відношення ймовірності відмови до ВБР  $\rho'_i = \frac{1 - R_i}{R_i}$  [11].

Тоді гранична величина  $\rho'$  буде дорівнювати одиниці. Це відбувається, коли  $R = 0.5$ , що вказує на марність детермінованих розрахунків для оцінки безпеки. При діагностуванні практичний інтерес представляють терміни наробітку, коли  $R \rightarrow 0,98 \dots 0,95$  і необхідно приймати рішення про подальшу експлуатацію елемента. У таких зонах оперативна характеристика ризику фактично збігається з ймовірністю відмови:  $\rho_i = 1 - R_i \approx \rho'_i$ . Тому частотна складова ризиків елементів може характеризувати безпечний стан системи.

**Індекс безпеки для систем.** Складності об'єктивного встановлення граничних значень показників ризику спільно з їхньою низькою чутливістю до наробітку робить їх незручними в задачах прогнозування ТС. Обчислення позбавленого цих недоліків індексу безпеки для систем  $\beta_{\Sigma}$  засноване на його зв'язку з пошкодженням, яке відображає поточний ризик експлуатації. Враховуючи, що гарантований запас довговічності обернено пропорційний гарантованому пошкодженню,  $n_{Np} = a_p^{-1}$ , а індекс безпеки – його логарифм маємо  $\beta_p = -\lg a_p$  або  $a_p = 10^{-\beta_p}$ . Використовуючи (6) остаточно, отримуємо

$$\beta_{\Sigma p} = \lg \left( \sum U_{ij} \cdot 10^{-\beta_{ijp}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

де  $\beta_{ijp}$  – індекс безпеки  $i$ -го елемента для  $j$ -го пошкоджуючого процесу, отримані за функцією розподілу ресурсу та наробітку для ймовірності  $P$ .

Поведінка індексу безпеки системи під час експлуатації подібна до поведінки функції елемента  $\beta(t)$ : він обернений логарифму наробітку, його граничне значення дорівнює нулю, коли ще зберігається необхідний рівень безпеки.

**Приклад.** Термін служби наконечників кисневих фурм для продування конвертора зумовлений двома пошкоджуючими процесами: а) зростанням наскрізної тріщини, що веде до витoku охолоджуючої води; б) розпалом сопла, що знижує ефективність плавки. За результатами аналізу відмов (44 випадки за рік) апостеріорно були отримані фактичні ФРД, яка вимірювалася числом плавок:

$$\left. \begin{aligned} \lg T_{cp} &= 2.27 \cdot (1 \pm u_p \cdot 0.126) - \text{для тріщин,} \\ \lg T_{wp} &= 2.78 \cdot (1 \pm u_p \cdot 0.047) - \text{для розпалу} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Згідно з процедурою «дерева відмов» при розвитку пошкоджень збиток від аварій внаслідок наскрізних тріщин був оцінений в 256 плавок, а збиток від розпалу сопел – в 54 плавки. Тоді відносна тяжкість шкоди складала  $\pi_c = 0,83$ ,  $\pi_w = 0,17$ . Кількість типів відмов розподілилися порівну  $c_c = c_w = 0,5$ .

На початок експлуатації фурми з новим наконечником первісні індекси безпеки становлять  $\beta_{c98} = 1,69$ ,  $\beta_{w98} = 2,52$ , що дає

$$\beta_{\Sigma 98} = \lg(0.5 \cdot 0.17 \cdot 10^{-2.52} + 0.5 \cdot 0.83 \cdot 10^{-1.69}) = 2.06.$$

Зауважимо, що при  $U_{\Sigma} = U_w = 1$   $\beta_{\Sigma 98} = 1.63$ , який менше, ніж окремі  $\beta_{c98}$  і  $\beta_{w98}$ . Таким чином, для рівня безпеки  $R=0,98$  термін експлуатації наконечників дослідженої конструкції становить  $10^{2.06} = 115$  плавок.

Особливість подібних апостеріорних моделей в тому, що на відміну від апріорних моделей, вони не володіють властивістю уточнення ресурсу, коли безпека підтримується при експлуатації.

Щоб мати таку можливість слід: а) отримати модель довговічності ймовірно-фізичними методами або б) використовувати інші діагностичні ознаки, ніж наробіток, наприклад, витрати охолоджуючої води та дуття.

**Висновки.** Аналіз методів оцінювання надійності складної технічної системи показав, що її некоректно здійснювати за показниками надійності окремих елементів або пошкоджуючих процесів. Ризик і безпеку механічної системи можливо оцінити за окремими показниками ризику її елементів. З цією метою запропоновано відповідну методику, що оперує як ризиком, так і індексом безпеки.

Стратегія технічного обслуговування за фактичним технічним станом з контролем надійності неспроможна для унікального технологічного обладнання. У її розвиток запропонована стратегія технічного обслуговування з контролем безпеки.

Лінійний характер зміни в часі запропонованого індексу безпеки дає можливість обґрунтовано планувати ритмічний (з постійним інтервалом наробітку) графік ремонтно-контролюючих заходів.

#### Література

1. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание [Текст] / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392с.
2. Модели вероятности безотказной работы и безопасности при оценке технического состояния [Текст] / С.В. Белодеденко, В.И. Гануш, С.В. Филипченков, Ю.Г. Цыбанев // Системные технологии. Регионал. межвуз. сб. научн.тр. – Вып. 2 (67). – Т.1. – Днепропетровск, 2010. – С. 159–166.
3. Прогнозирование технического состояния и обеспечение безопасности при эксплуатации механических систем в металлургии [Текст] / С.В. Белодеденко, В.И. Гануш, С.В. Филипченков, А.В. Попов // Вибрации машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – №1. – С.15–22.



4. Harkins W. Spectral fatigue reliability/ W. Harkins// Lesson NASA 0699, 1999-02-01. – 6p. (www.nasa.gov).
5. Huther M. Probabilistic and semi- probabilistic format in fatigue ship classification rules/ M. Huther, S.Maherault, G.Parmentier, G.Cesarine // Fatigue testing and analysis under variable amplitude loading.- Mayfield, PA: ASTM, 2005. – P. 535–543.
6. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям [Текст] / С.В. Белодеденко, В.Ю. Богдан, Е.И. Хребто, А.В. Ларионцев // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2007. – №6. – С.94–98.
7. Клюев, В.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов [Текст] / В.В. Клюев, А.С. Фурсов, М.В. Филиппов // *Контроль. Диагностика.* – 2007. – №3. – С. 18–23.
8. Белодеденко, С.В. Развитие методов расчета и исследований прочности металлургического оборудования [Текст] / С.В. Белодеденко // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2009. – №4. – С.94–98.
9. Переверзев, Е.С. Методы учета зависимости между элементами при расчете показателей надежности [Текст] / Е.С. Переверзев // *Надійність машин та прогнозування їх ресурсу: Доповіді міжнар. наук.-техн.конф.* – Івано-Франківськ:ІФДТУНГ, 2000. – Т.1. – С.112–119.
10. Александровская, Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст] / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 208с.
11. Махутов Н. А. Риск применения и безопасность силовых систем [Текст] / Н.А. Махутов, Л.А. Сосновский // *Трибофатика: тр. 4-го Междунар. симпозиума.* – Тернополь: ТГТУ, 2002. – С. 44–49.