

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ

*Л. Д. Третьякова, канд. техн. наук, П. С. Биченко, магістр (НТУУ «КПІ»)*

*Предложена математическая модель для расчета показателей надежности изделий. Экспериментально определены показатели надежности защитной одежды, используемой персоналом атомных электрических станций при проведении профилактических и ремонтных работ.*

*Запропоновано математичну модель для аналізу показників надійності виробів. Експериментально визначено показники надійності захисного одягу, який застосовує персонал атомних електричних станцій для ремонтно-профілактичних робіт.*

*The mathematical model for reliability parameters calculation of products is suggested. Reliability parameters of the protective clothes used by the personnel of nuclear power plants at carrying out preventive and repair work are experimentally defined.*

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – це такий вид продукції, зниження захисних властивостей якої може становити загрозу для здоров'я, а в деяких випадках і для життя виробничого персоналу. Безвідмовне виконання своїх функцій – найважливіша вимога до сучасних ЗІЗ. Ця вимога може бути забезпечена тільки певними заходами на стадії конструювання, виготовлення, експлуатації та зберігання. Критерії розроблення таких заходів базуються на показниках надійності. Надійність – це здатність виробу зберігати захисні властивості в певних кліматичних умовах у певні строки експлуатації. Надійність визначається ймовірністю експлуатації виробу без відмов у якомусь часовому діапазоні. Відмова – це недотримання вимог до виробу і його параметрів, зазначених у ТУ. Відмова в роботі ЗІЗ може виникнути в разі порушення його герметичності внаслідок розривання, проколювання, розтріскування матеріалу, швів, фурнітури.

Під час визначення надійності складного виробу, який має багато елементів, потрібно проаналізувати його структурну схему і виявити функціональні зміни параметрів з урахуванням взаємодії елементів з довкіллям, умовами застосування, чищення і зберігання. Нині чимало ЗІЗ, таких як захисний одяг, протигазові маски, респіратори, рукавиці, виготовляють з полімерних матеріалів – полівінілхлориду (ПВХ), поліетилену, поліпропілену та їхніх модифікацій. Досвід використання виробів з полімерних матеріалів на промислових підприємствах різних галузей [1, 2] свідчить про їхню ефективність.

Мета статті – розроблення математичної моделі надійності ЗІЗ. Предметом досліджень є динаміка змін ймовірних характеристик надійності ЗІЗ. Об'єкт досліджень – негерметичний захисний одяг з ПВХ, виготовлений методом зварювання струмами високої частоти за типовими моделями: комбінезон з каптуром, костюм, який складається з півкомбінезона та куртки.

Надійність виробу залежить від багатьох факторів, що мають зазвичай випадковий характер, тому кількісна оцінка надійності визначається як

величина ймовірності безвідмовної роботи виробу  $P(t)$  у функції часу  $t$  та середнім часом безвідмовної роботи  $T_0$  [3, 4]. Для характеристики швидкості зміни функції  $P(t)$  використовують параметр інтенсивності відмов  $\lambda(t)$ . Інтенсивність відмов визначається як відношення кількості виробів, що вийшли з ладу, до числа неушкоджених виробів на момент визначення. Інтенсивність відмов ЗІЗ (наприклад, герметичного, негерметичного, фільтрувального одягу, респіраторів) доцільно оцінювати не протягом всього строку експлуатації, а протягом циклу. Такі ЗІЗ використовують для ремонтно-профілактичних, аварійних і післяаварійних робіт, тому для користувача важливо знати ймовірність того, що виріб працюватиме без відмов у довільно вибраний проміжок часу. Кількісно таку характеристику оцінюють коефіцієнтом готовності, який визначається за формулою

$$K_{\Gamma} = \frac{t_p}{t_p + t_o + t_{зб}}, \quad (1)$$

де  $t_p$  – час експлуатації;  $t_o$  – час очищення або дезактивації;  $t_{зб}$  – час зберігання.

Для визначення надійності виробу запропоновано математичну модель у вигляді системи з  $n$  простих елементів, кожен з яких має свою величину надійності (рис. 1). Модель захисного одягу складається з таких елементів: 1 – частини конструкції (пілочка, спинка, рукав та ін.); 2 – шви; 3 – оздоблювальні елементи (каптур, кишені); 4 – фурнітура. Надійність окремих елементів  $P_i(t)$  виробу визначається властивостями матеріалу, технологією з'єднання швів, рівнем теплового та механічного навантаження. За ознаками надійності ці елементи з'єднано послідовно, оскільки припускається, що відмова одного елемента спричиняє порушення захисних властивостей усього виробу.

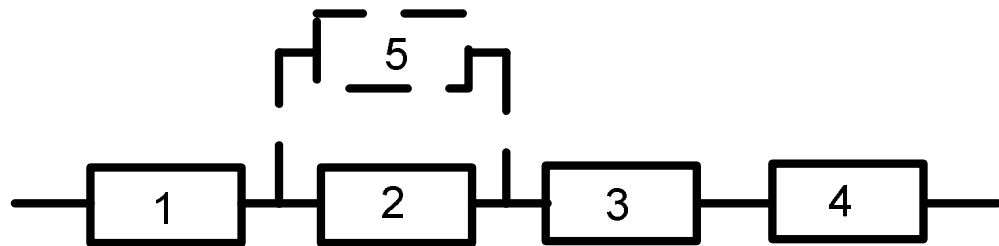


Рис. 1. Модель складного виробу

Для підвищення надійності виробу в цілому деякі елементи можуть резервуватися, наприклад, 5 – резервний елемент для 2. Припускають, що відмови елементів незалежні один від одного. Безвідмовна робота всього виробу є складним процесом, ймовірність якого є добутком ймовірностей безвідмовної роботи кожного елемента. У такий спосіб надійність виробу визначається за формулою

$$P_{\text{виробу}}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2)$$

де  $n$  – кількість елементів виробу.

Таким чином, із закону множення випадкових явищ випливає, що надійність виробу можна підвищити шляхом:

збільшення надійності окремих елементів;

зменшення кількості елементів;

введення резервних елементів.

Другий і третій способи реалізуються на стадії проектування конструкції: в захисний одяг вносять мінімально можливу кількість членувань, а в місцях з підвищеним механічним навантаженням – додаткові вкладки.

Для характеристики надійності кожного елементу виробу потрібно визначити інтенсивність відмов, середнє напрацювання на відмову  $T_0$ , середній строк служби до списання  $T_{p.c.p.cп}$ . Кількісну оцінку параметрів надійності визначено із статистичної інформації, отриманої в промислових умовах експлуатації. Під час статистичних досліджень інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  [1/год] визначається за формулою

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{cep}(t) \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

де  $n(t)$  – кількість виробів, які вийшли з ладу за строк  $t \pm \Delta t/2$ ;  $N_{cep}(t)$  – середня кількість неушкоджених виробів, що використовуються до моменту часу  $t$ .

$$N_{cep}(t) = \frac{N(t-\Delta t/2) + N(t+\Delta t/2)}{2}, \quad (4)$$

де  $N$  – кількість неушкоджених виробів у інтервалі часу  $(t \pm \Delta t/2)$ .

Захисний одяг з ПВХ – це одяг багаторазового використання, дезактивується до 15 циклів. Такий одяг належить до невідновлюваних виробів, тобто після відмови його не ремонтують. Інтенсивність відмов ( $\lambda$ -характеристика) визначається для всього періоду експлуатації (рис. 2).

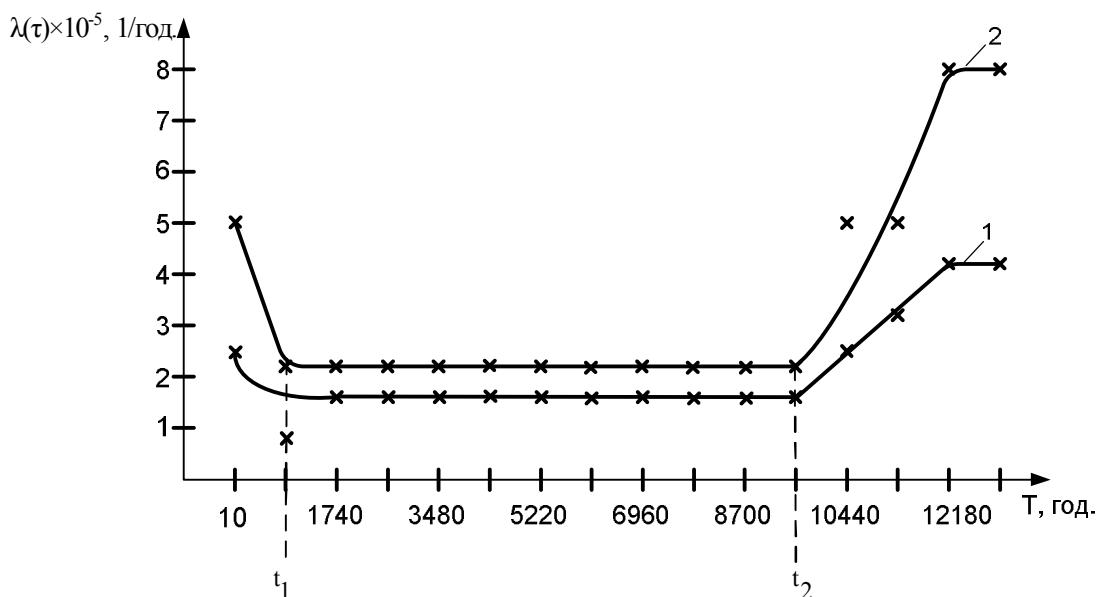


Рис. 2. Залежність інтенсивності відмов під час експлуатації: 1 – для матеріалу; 2 – для швів

Для отримання точнішого значення  $\lambda(t)$  період досліджень  $T$  ділили на інтервали  $\Delta t$ , які визначали за формулою

$$\Delta t = t_p + t_o + t_{зб}. \quad (5)$$

Підвищений рівень  $\lambda$  на першій ділянці ( $0 - t_1$ ) зумовлений виробничими дефектами виробів (непрошиті або непроварені ділянки швів, відсутність гудзиків, ушкодження фурнітури), які не пройшли вихідного контролю. Друга ділянка ( $t_1 - t_2$ ) визначає ефективний період експлуатації, і відмови на цій ділянці не передбачені. Причини відмов на другій ділянці зумовлені прихованими дефектами виробів, які не виявляються звичайними методами контролю якості (відхилення в технології виготовлення швів, збігання, повітряні добавки в матеріалах) і режимами експлуатації, за яких виникають концентрації навантажень на слабких ділянках елементів виробів. Певною мірою непередбачені відмови (НВ) характеризують вади виробу, які не визначалися на етапі контролювання показників якості. Величину  $\lambda(t)$  на другій ділянці можна вважати сталою величиною, і строк, упродовж якого  $\lambda(t) = \text{const}$ , є гарантійним строком експлуатації. Таким чином, на другій ділянці в період ефективної експлуатації визначається середнє напрацювання на відмову  $T_0$  і ймовірність безвідмовної роботи  $P(t_{\sigma,p})$ . Залежність між функцією надійності та інтенсивністю відмов для кожного елемента моделі визначається за формулою

$$\lambda(t) = \frac{W(t_{\sigma,p})}{P(t_{\sigma,p})}, \quad (6)$$

де  $W(t_{\sigma,p})$  – щільність розподілу часу НВ елементів.

Після інтегрування функції (6) отримано

$$P(t_{\sigma,p}) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (7)$$

При  $\lambda(t) \approx \text{const}$  формула (7) набуває вигляду

$$P(t_{\sigma,p}) = e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

За наближеної оцінки формулу (8) можна перетворити:

$$P(t_{\sigma,p}) = 1 - \lambda t. \quad (9)$$

На надійність ЗІЗ з полімерних матеріалів впливає робота при знижених або підвищених температурах, режим підвищених механічних навантажень, режими дезактивації. Надійність матеріалу і швів залежить від їхніх фізико-механічних характеристик [5]. Зміни фізико-механічних характеристик під впливом температури визначалися під час експериментальних досліджень.

Вплив температури на матеріали досліджувався в кліматичній камері впродовж 6 годин, що відповідає натурним вимірам упродовж 225 годин. Дослідження здійснювалися відповідно до вимог стандарту [6], експлуатаційні кліматичні умови приймалися такі:  $\theta = 22...24$  °С, відносна вологість – 60 %. Досліджувалися 12 зразків ПВХ-пластикатів з різною поверхневою щільністю та модифікаторами. Під час досліджень визначалися параметри, зазначені в ТУ: розривне навантаження, подовження під час розривання; міцність до розривання; міцність до роздирання, опір роздиранню, стійкість до стирання та розтріскування за багаторазових згинань, стійкість до проколювання.

Для порівняльної оцінки впливу температурного режиму на надійність введено показник відносної зміни інтенсивності відмов  $\alpha_i$ .

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} = f(\varphi), \quad (10)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмов при температурі, відмінній від нормальної експлуатації;  $\lambda_0$  – інтенсивність відмов при  $\theta = 22$  °С;  $\varphi$  – значення параметра, який характеризує режим використання елемента. Графіки таких залежностей є сімейством кривих, що виражають відносну зміну  $\alpha$  залежно від властивостей матеріалів та дії різних видів навантажень (рис. 3).

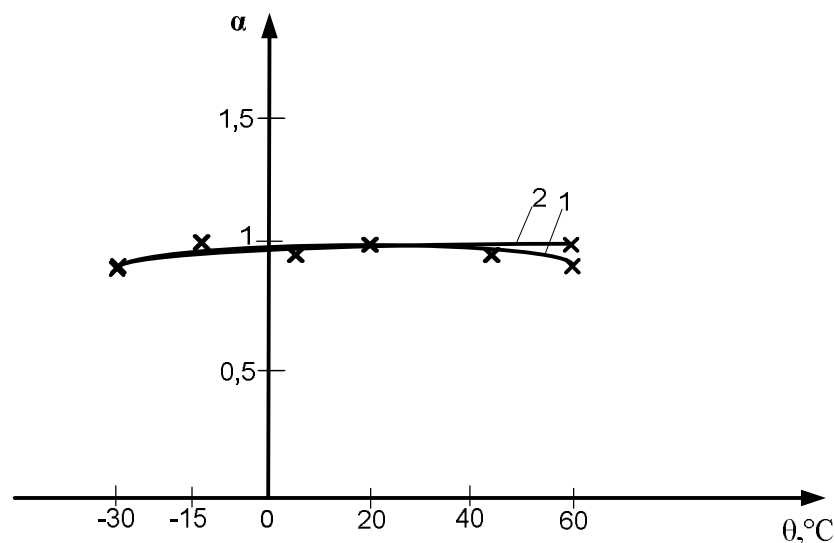


Рис. 3. Залежність інтенсивності відмов матеріалу від температури при механічних навантаженнях під час розривання: 1 – ПВХ-пластикат товщиною 0,15 мм; 2 – модифікований ПВХ-пластикат «Протектор 2000»

Третя ділянка  $\lambda$ -характеристики ( $T \geq t_2$ ) зумовлена одночасним зносом та старінням матеріалу і визначається для виробів багаторазового використання. Необоротні процеси старіння є функцією енергії, яка поглинається виробами із зовнішнього простору і під впливом якої виникають хімічні реакції (ультрафіолетове та іонізуючі випромінювання), фізичні деформації молекулярної структури матеріалу (вплив електричних, механічних, теплових

полів), дифузія між окремими частинами матеріалу і швів, що створює різницю в міцності окремих елементів. Під дією зовнішніх факторів параметри виробу змінюються настільки, що виходять за межі допусків ТУ. Процес старіння елементів виробу не є стаціонарним, тому що зміна параметрів у кожний момент часу залежить від того, наскільки змінився цей параметр порівняно з номінальним значенням за попередній час. У цей період поступові відмови (ПВ) залежать від великої кількості різних причин, кожна з яких є випадковою. На останній ділянці  $\lambda$ -характеристики щільність розподілу часу ПВ виражається функцією нормального розподілу

$$W(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_{p,cr,sp})^2}{2\sigma_{p,cr,sp}^2}}, \quad (11)$$

де  $T_{p,cr,sp}$ ,  $\sigma_{p,cr,sp}$  – математичне очікування та середньоквадратичне відхилення часу роботи без ПВ.

Під час експериментального визначення параметрів  $T_{p,cr,sp}$ ,  $\sigma_{p,cr,sp}$  елементи виробів досліджувалися в кліматичних камерах в умовах, близьких до реальних, упродовж часу, необхідного для повного руйнування. Ймовірність безвідмовної роботи за ПВ визначено за формулою

$$P(t_{ПВ}) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t=T_0}^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{p,cr,sp})^2}{2\sigma_{p,cr,sp}^2}} dt. \quad (12)$$

Перетворення при використанні функції Лапласа дає розрахункову формулу визначення  $t_{ПВ}$

$$P(t_{ПВ}) = \left[ 0,5 - \frac{\Phi(t - T_{p,cr,sp})}{\sigma_{p,cr,sp}} \right], \quad (13)$$

де  $\frac{\Phi(t - T_{p,cr,sp})}{\sigma_{p,cr,sp}}$  – функція Лапласа.

Таким чином, робота елементів без відмов є складним випадковим процесом, в якому суміщаються два незалежних процеси – відсутність і НВ, і ПВ. Імовірність такого виду складного процесу дорівнює добутку ймовірностей більш простих процесів [7]. Застосовуючи правило множення ймовірностей, можна записати

$$P(t_i) = P(t_{\sigma,p}) \cdot P(t_{ПВ}) = e^{-\lambda t} \left[ 0,5 - \frac{\Phi(t - T_{p,cr,sp})}{\sigma_{p,cr,sp}} \right]. \quad (14)$$

Отже, результуюча величина надійності  $P(t)$   $i$ -го елемента є композицією двох функцій розподілу – експонентної та нормальної (рис. 4).

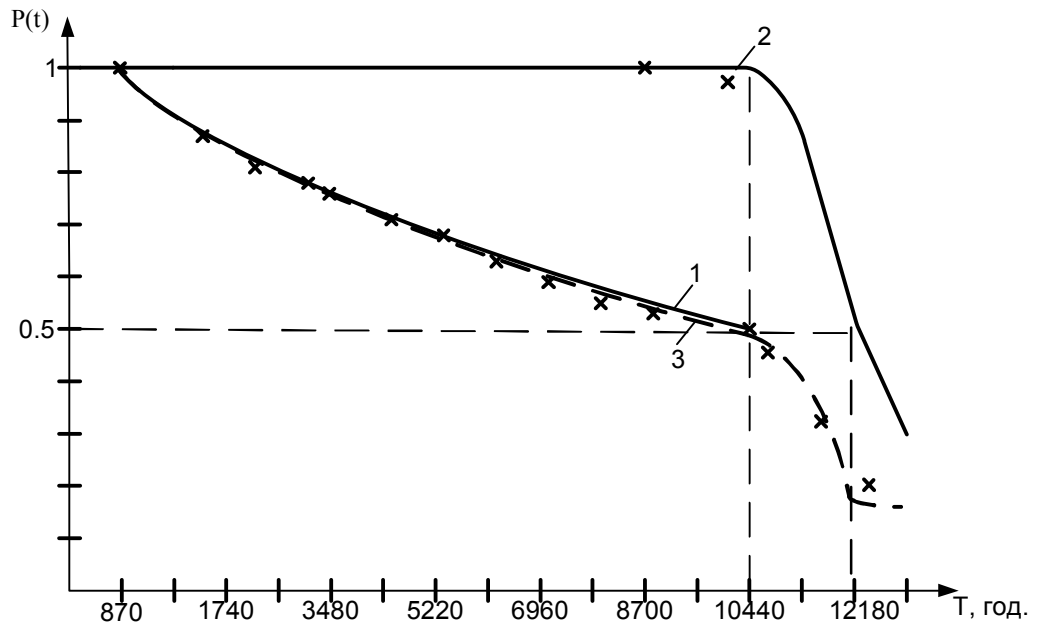


Рис. 4. Графік функції надійності виробу: 1 – за ознакою НВ в період ефективної експлуатації; 2 – за ознакою ПВ в період старіння; 3 – результуюча

Надійність виробу  $P(t_{6,p})$  у період ефективної експлуатації для моделі, зображеної на рис. 1, за умови, що надійність кожного елемента описується експоненціальним законом, визначається за формулою

$$P(t_{6,p}) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t} \quad (15)$$

Середній час безвідмовного використання виробу

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} \quad (16)$$

У таблиці наведено інформацію про показники надійності елементів виробів з ПВХ-пластикату та виробу загалом. Результати експериментальних досліджень, наведені в таблиці, показали, що зменшення інтенсивності відмов окремих елементів забезпечує зростання надійності і строку використання виробу загалом.

#### Показники надійності захисного одягу

Вид елемента виробу	Інтенсивність відмов, 1/год	Середнє напрацювання на відмову $T_0$ , год.	Середній строк служби $T_{p.c.p.c.p}$ , ГОД.
Матеріал	$1,58 \cdot 10^{-5}$	17520	19100
Шви	$2,25 \cdot 10^{-5}$	14470	15917
Фурнітура	$1,66 \cdot 10^{-5}$	16640	18130
Каптур	$1,66 \cdot 10^{-5}$	16640	18130
Виріб загалом	$7,15 \cdot 10^{-5}$	13970	15360

## Висновки

1. ЗІЗ є складними виробами, для яких необхідно забезпечити високу надійність у використанні впродовж усього періоду експлуатації.

2. Запропоновано математичну модель для оцінки надійності ЗІЗ. Це дало змогу визначити ймовірність і середній час безвідмовної роботи та середній ресурс до списання.

3. Для підвищення надійності ЗІЗ необхідно в процесі конструювання і виготовлення передбачати заходи щодо зниження інтенсивності відмов окремих елементів, зменшувати кількість елементів у виробі, запроваджувати системи резервування ділянок з підвищеним навантаженням.

4. Використання сучасних методів контролю та метрологічної апаратури, які регламентуються державними стандартами, запровадженими під час гармонізації європейських стандартів, дасть змогу зменшити кількість непередбачених відмов.

1. *Селіверстов А. Є., Литвиненко Г. Є., Третьякова Л. Д.* Розробка засобів індивідуального захисту для працівників об'єктів ядерної енергетики // Вісник Національного науково-дослідного інституту охорони праці. – К.: ННДІОП. – 2004. – № 7. – С. 3–5.

2. *Голубеев М. И., Синева Н. А., Чихалов М. С.* Анализ современных материалов для спецодежды // Рабочая одежда. – 2003. – № 1. – С. 8–11.

3. *Кузьмин Ф. И.* Задачи обеспечения надежности технических систем. – М.: Радио и связь, 1982. – 175 с.

4. *Князев А. Д.* Элементы теории надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: МЭИ, 1988. – 114 с.

5. *Третьякова Л. Д.* Дослідження фізико-механічних характеристик нових полімерних матеріалів для захисного одягу // Проблеми охорони праці в Україні. – К.: ННДІОП. – 2008. – № 14. – С. 59–67.

6. *ГОСТ 9.708.* Полимерные материалы. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. – М.: ГКС. – поверхневою густиною 1990. – 80 с.

7. *Кенделл М., Стьюарт А.* Теория распределений: Пер. с англ./ Под ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1966. – 587 с.