

УДК 687.17

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО
ЗАХИСТУ В ЕКОНОМІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ**

Г. Є. ЛИТВИНЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

Л. Д. ТРЕТЯКОВА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

У статті розглянуто питання економічної доцільності підвищення надійності засобів індивідуального захисту. Запропоновано математичну модель, яка дає змогу визначити зміну вартості виробу під час провадження заходів з підвищення рівня надійності. Наведено алгоритм вибору економічно обгрунтованих заходів з підвищення надійності спеціального захисного одягу, який використовується на атомних електричних станціях

Невід'ємним складником сучасних систем забезпечення охорони праці є засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) виробничого персоналу. Залежно від призначення ЗІЗ згідно з [1] поділяють на 12 класів, кожен з яких складається з кількох десятків видів і типів. ЗІЗ також класифікують за терміном експлуатації: разові, з обмеженим терміном і багаторазового використання. Під час розгляду проблеми надійності засоби разового і з обмеженим терміном експлуатації віднесено до не відновлювальних виробів, засоби багаторазового використання – до відновлювальних. З поміж ЗІЗ за рівнем надійності виокремлено дві групи:

– вироби, яким потрібно забезпечити максимальний рівень надійності (герметичний одяг, гідрокостюм, протигаз, каска), тому що виникнення непередбачених відмов становить загрозу життю працівників;

– вироби, для яких максимальна надійність бажана, але дотримання цієї вимоги не обов'язкове. Якщо для першої групи виробів потрібен максимально можливий рівень надійності, то в другій групі можна розглядати різні варіанти рішення, які забезпечують досягнення визначеного рівня надійності за певних витрат. Таким чином, питання підвищення надійності стають не тільки технічними, а й економічними завданнями. Водночас з'являється проблема правильності визначення й вираження різних показників надійності, які поряд з технічними вимогами враховували б і економічні.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом досліджень є заходи з підвищення надійності та параметри конструкції захисного одягу, який застосовують під час регламентних робіт на атомних електричних станціях (АЕС). Предмет досліджень – динаміка зміни техніко-економічних показників захисного одягу під час підвищення надійності. Для визначення показників надійності та обгрунтування результатів використано ймовірні методи оцінки статистичних параметрів і графічно-аналітичні методи розрахунку. Всі заходи з підвищення надійності і збільшення середнього терміну служби до списання виробів можуть бути впроваджені в процесі проектно-конструкторської розробки, виготовлення та експлуатації (рис. 1).

У процесі проектування захисного одягу вирізняють такі основні заходи: класифікація основних рухів і енергетичних витрат працівників; визначення рівня впливу електростатичних і зовнішніх полів іонізуючого випромінювання; визначення рівня механічного і теплового навантаження на окремих ділянках виробу; вибір матеріалу з відповідними фізико-механічними (ФМХ), тепловими та електричними характеристиками [2].

У процесі конструкторської розробки потрібно передбачити: мінімізацію кількості елементів виробу та всього захисного комплексу; додаткові конструктивні елементи (фурнітура, еластичні вставки, обтюраторія) з відповідним рівнем ФМХ; резервні елементи (налокітники, наколінники, багат шарові пакети матеріалу).

Під час вибору технологій виготовлення й обробки потрібно забезпечити: використання сучасного обладнання для з'єднання деталей виробів (екзотермічне і ендотермічне зварювання, лиття); рівень ФМХ швів, який повинен відповідати вимогам стандартів (EN 943--1:2002); герметизацію і резервування ділянок з підвищеним рівнем навантаження (комбіновані шви, герметизація, клейові стрічки) [3].

У процесі експлуатації ЗІЗ можна використовувати в умовах впливу зовнішніх теплових, електромагнітних, іонізуючих полів, дія яких призводить до передчасного старіння матеріалу. Виходячи з цього, виробники ЗІЗ вказують у технічних умовах (ТУ) граничні умови (температура і вологість, рівень гранично допустимої концентрації шкідливих речовин або факторів, кількість циклів чищення, гарантійний термін використання) експлуатації, зберігання і чищення виробів, але не можуть суттєво впливати на рівень надійності в процесі експлуатації.

Таким чином, процес підвищення надійності для кожного виду ЗІЗ потребує окремого опрацювання і має велику кількість варіантів.

Проте всі ці заходи мають певну особливість -- вони впливають на вартість виробу. Під час вибору заходів з підвищення надійності запропоновано застосовувати математичну модель, яка об'єднує вартісні показники (вартість, термін окупності) і показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи виробу, інтенсивність відмов, середній час роботи без відмов) і дає змогу прийняти економічно вигідні рішення.

Постановка завдання

Мета статті – обґрунтувати застосування математичної моделі як ефективного засобу оцінки економічності здійснення заходів з підвищення надійності ЗІЗ.

Результати та їх обговорення

Надійність виробу залежить від багатьох факторів, що мають зазвичай випадковий характер, тому кількісну оцінку надійності визначають як величину ймовірності безвідмовної роботи виробу $P(t)$ у функції часу t [4].

Для характеристики швидкості зміни функції $P(t)$ використовують параметр інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Для однотипних виробів у період ефективної експлуатації випадковий процес є стаціонарним, тобто щільність потоку відмови постійна в часі і не залежить від точки відліку, $\lambda(t) \approx \text{const}$ і $P(t)$ визначають за формулою

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

Апостеріорі можна вважати, що функція вартості виробів C (P_0, P_1) під час підвищення їхньої надійності з $P_0(t)$ до $P_1(t)$ має такі властивості:

1. $C(P_0, P_1) \geq 0$, тому що вартість завжди позитивна величина;
2. $C(P_0, P_1)$ є функцією завжди щораз більшою;

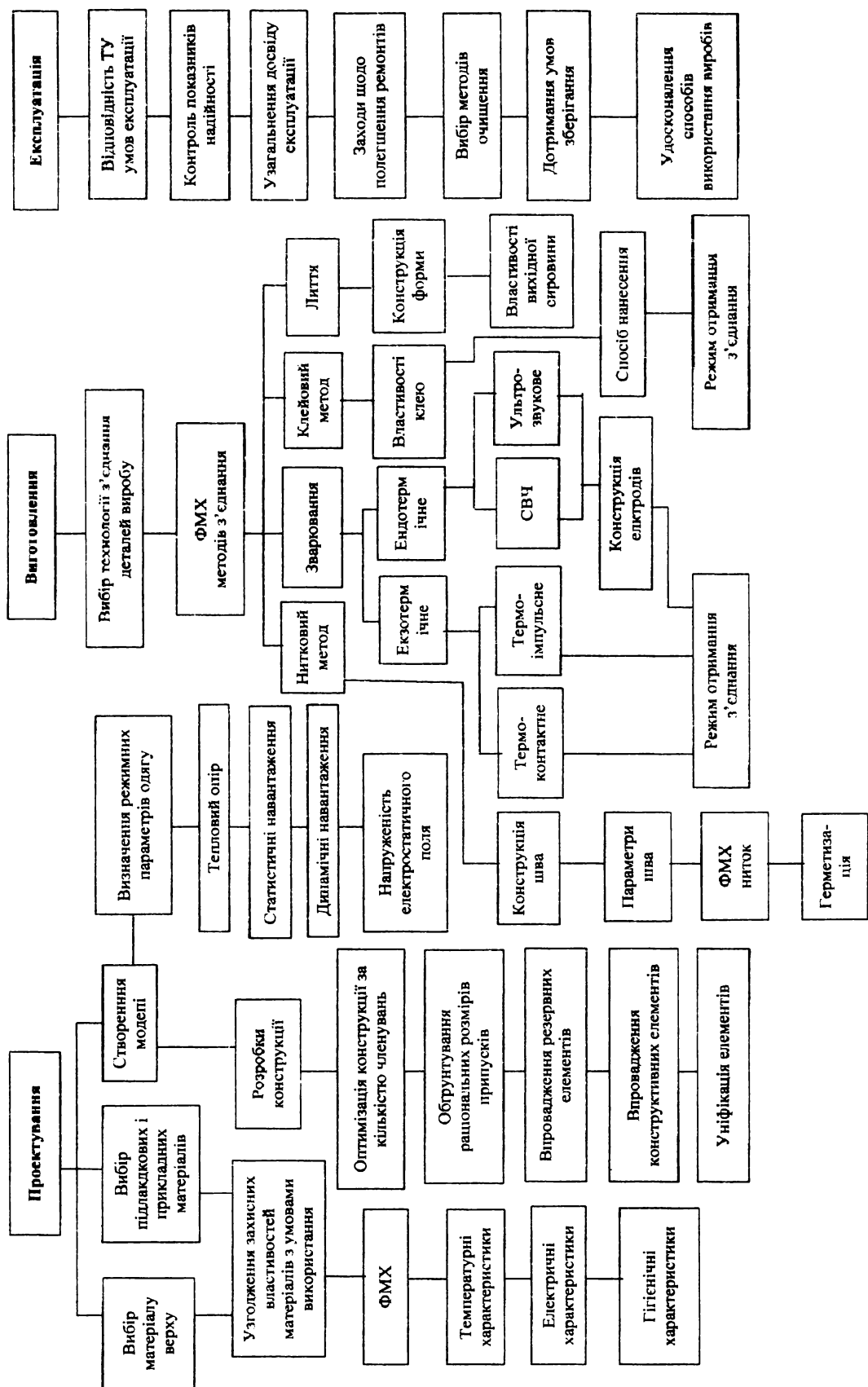


Рис. 1. Класифікація заходів підвищення надійності

3. $C(P_0, 1) = \infty$, тому що отримати абсолютну надійність неможливо. Для оцінки впливу надійності на вартість C під час виготовлення запропоновано математичну модель у вигляді функції, яка відповідає вказаним умовам.

$$C = C_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^\alpha, \tag{2}$$

де C_0 – вихідна вартість за $P_0(t)$; λ_0 – інтенсивність відмов за $P_0(t)$; λ_1 – інтенсивність відмов за $P_1(t)$.

Таку модель застосовано для невідновлюваних виробів [5], коли підвищення надійності здійснюється за рахунок зменшення інтенсивності відмов у продовж середнього напрацювання на відмову T_0 . За $\lambda(t) \approx \text{const}$ формула (2) набирає вигляд

$$C = C_0 \left(\frac{\ln P_0(t)}{\ln P_1(t)} \right)^\alpha. \tag{3}$$

Коефіцієнт α в моделі (3) підбирають таким чином, щоб у найкращий спосіб апроксимувати реальну залежність вартості виробу від надійності і визначають додатковими витратами, що залежать від запропонованих способів підвищення надійності конкретного виробу. Цей коефіцієнт характеризує ефективність вкладення коштів для підвищення надійності: якщо $\alpha = 0$, то підвищення рівня надійності може досягатися без додаткових витрат, тому що вартість виробу залишається незмінною; якщо $\alpha > 0$, то підвищення надійності потребує додаткових затрат, внаслідок чого вартість виробу зростає. У цьому разі витрати на підвищення надійності окупляться не одразу, а впродовж терміну окупності τ . У загальному випадку, коли для підвищення надійності обрано визначені заходи (наприклад розробка нової базової моделі, заміна матеріалу, зміни технології з'єднання швів), у результаті яких змінюється $\lambda(t)$, імовірність безвідмовної роботи в продовж часу визначається:

– для вихідного варіанта

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t};$$

-- для нового варіанта за $\lambda_2 < \lambda_1$

$$P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}.$$

Відповідно кількість виробів, що забезпечують роботу без відмов упродовж часу $t \geq T_0$.

$$N_1 = A \cdot e^{\lambda_1 t},$$

$$N_2 = A \cdot e^{\lambda_2 t}, \tag{4}$$

де A – необхідна кількість ЗІЗ.

У загальному випадку, коли підвищення рівня надійності пов'язано з додатковими витратами, тобто $C_2 > C_1$, вартість виробу за період $t \geq T_0$ визначається

– для вихідного варіанта

$$C_1^{(t)} = C_1 \cdot e^{\alpha \lambda_1 t} \tag{5}$$

-- для нового варіанта

$$C_2^{(t)} = C_2 \cdot e^{\alpha \lambda_2 t}.$$

З урахуванням того, що під час збільшення терміну використання величина $C_1^{(t)}$ зростає швидше, а ніж величина $C_2^{(t)}$, співвідношення між $C_{e1}^{(t)}$ та $C_{e2}^{(t)}$ продовж часу змінюватимуться (рис. 2).

Розглянемо такі закономірності на прикладі ізолювального одягу з полівінілхлориду (ПВХ)-пластикату, який використовують на АЕС як ЗІЗ під час ремонтно-профілактичних і дезактиваційних робіт [6]. Під час експериментальних досліджень визначено, що інтенсивність відмов для всього виробу становить $\lambda_1(t) = 7,15 \cdot 10^{-5}$ (1/год). У результаті аналізу надійності окремих елементів одягу, а саме: матеріалу, швів, фурнітури та конструктивних і оздоблювальних елементів визначено, що найбільше значення інтенсивності відмов мають шви $\lambda(t)_{\text{ш}} = 2,25 \cdot 10^{-5}$ (1/год). Впровадження змін у технологію виготовлення одягу під час використання устаткування, яке дає змогу з'єднувати шви методом зварювання струмами високої частоти (СВЧ) (заміна сталевих електродів на латунні, оптимізація режимних параметрів струму, тиску і тривалості процесу) уможливило зменшити значення $\lambda(t)_{\text{ш}}$ до рівня $1,66 \cdot 10^{-5}$ і тим самим зменшити інтенсивність відмов для всього виробу до рівня $\lambda_2(t) = 4,11 \cdot 10^{-5}$ (1/год). Після внесення змін у базову конструкцію інтенсивність відмов знижено до рівня $\lambda_3(t) = 3,82 \cdot 10^{-5}$ (1/год).

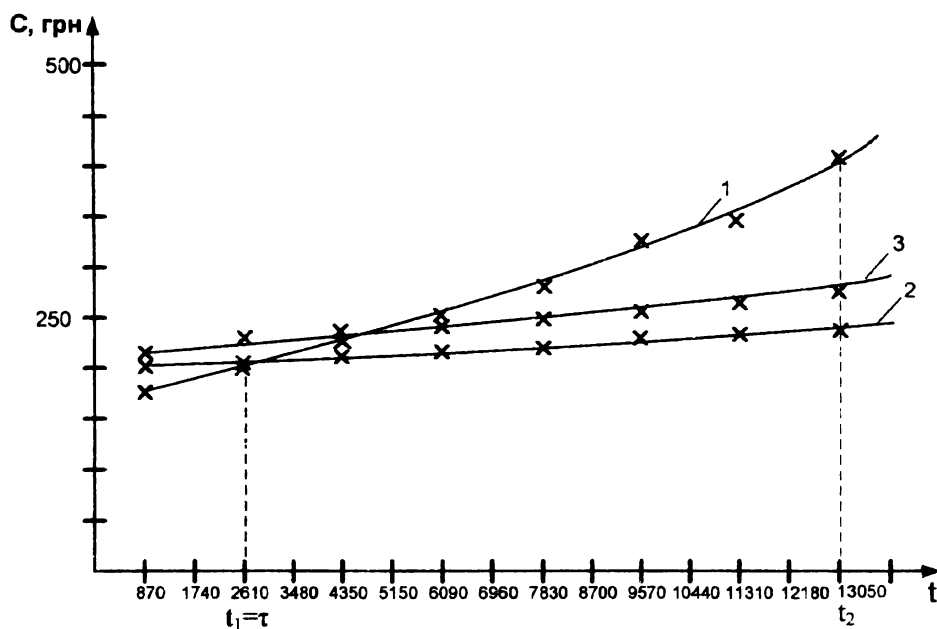


Рис. 2. Залежність вартості виробу від терміну використання :

1 – для вихідного варіанта; 2 – для другого варіанта за $\lambda_2 < \lambda_1$; 3 – для третього варіанта за $\lambda_3 < \lambda_2$

Розглянемо, як змінюється співвідношення (5) упродовж часу і до яких економічних результатів це призводить. На першій $(0 - t_1)$ ділянці $C_1^{(t)} < C_2^{(t)}$, тобто вихідний варіант більш економічний. За $t_1 = \tau$ $C_1^{(t)} = C_2^{(t)}$ підвищення рівня надійності виробу ще не дає економічного ефекту, та вже окупається. На третій $(\tau - t_2)$ ділянці $C_1^{(t)} > C_2^{(t)}$ і створюється економія, величина якої збільшується впродовж часу. Таким чином, зі співвідношення $C_1^{(t)} = C_2^{(t)}$ визначається термін окупності впровадженого заходу

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (6)$$

Порівняння залежностей 2 і 3 (рис. 2) виявило, що зменшення $\lambda(t)$ призводить до зростання терміну окупності виробу. Для сучасних ЗІЗ, виготовлених з полімерних матеріалів, термін окупності не може перевищувати час, з якого починаються необоротні процеси старіння матеріалу. Як свідчить досвід використання [6], для таких ЗІЗ доцільним є термін окупності, який не перевищує половини середнього напрацювання на відмову T_0

$$\tau_{\text{ад.}} = 0,5T_0 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_1}.$$

Після ділення виразу (6) на T_0 отримано

$$\frac{\tau}{T_0} = \frac{\alpha \cdot \lambda_1 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (7)$$

З формули (7) визначено коефіцієнт α

$$\alpha = \frac{\tau}{T_0} \cdot \frac{(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1})}{\ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (8)$$

Для ЗІЗ з високим початковим рівнем надійності (герметичний і фільтрувальний одяг, протигаз) критерієм отримання економії є виконання нерівності $\tau \leq T$ сл.сп., за $T_{\text{сл.сп.}}$ – середній термін служби до списання. Споживач виробів з підвищеним рівнем надійності отримає економію E впродовж часу $T_{\text{сл.сп.}}$, за рахунок зменшення інтенсивності відмов.

Величина $E(t)$ визначається за формулою

$$E(t) = [(e^{\lambda_1 t} - 1) - (\Delta)(e^{\lambda_2 t} - 1)]A \cdot C_1, \quad (9)$$

де Δ – індекс вартості C_2/C_1 .

Розглянемо ефективність застосування запропонованої моделі на прикладі таких видів захисного одягу:

1. Захисний одяг (комбінезон) з поліетилену разового застосування, $T_{\text{сл.сп.}} = 14$ год.
2. Ізолювальний одяг (куртка й напівкомбінезон) з ПВХ-пластикату, циклічного застосування, $T_{\text{сл.сп.}} = 15360$ год.
3. Фільтрувальний одяг (комбінезон) циклічного застосування, $T_{\text{сл.сп.}} = 87\,600$ год.

Захисний одяг з поліетилену призначено для щоденного використання, відмова виникає в разі механічного ушкодження матеріалу або шва.

Фільтрувальний одяг виготовляють у вигляді комбінезону на швейному устаткуванні з пакета матеріалів: матеріал зовнішній – камуфльована тканина, водостійка; матеріал внутрішній – тришарова система матеріалів (поліестр, поліуретан з активованим вуглецем, трикотаж), з'єднаних хімічним способом. Зовнішній шар присднують механічним (швейним) способом.

Необхідно підвищити надійність $A = 200$ костюмів до рівня $P_2(t)$, який визначає споживач продукції. Визначити нову вартість захисного одягу та економію коштів за період експлуатації $t = T_0$. Розрахунок здійснено відповідно до алгоритму:

1. Визначено за формулою (1) $\lambda_2(t)$ за $P_2(t)$.

2. Для визначення економічно доцільної вартості нового одягу застосовано математичну модель (2).

3. Визначено за формулою (8) коефіцієнт α .

4. Кількість костюмів за першим і другим варіантами, які забезпечують роботу без відмов T_0 визначено за формулою (4).

5. Визначено економію за формулою (9) від застосування костюмів з підвищеним рівнем надійності $P_2(t)$. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку

Вид одягу	Початковий рівень надійності, $P(T_1)$	Необхідний рівень надійності, $P(T_1)$	Термін окупності, t , год.	Початкова вартість, C_1 , грн	Економічно доцільна вартість, C_2 , грн	Економія, $E(T_0)$, %
Комбінезон з поліетилену	0,21	0,75	4,5	54,0	81,1	51,8
Костюм з ПВХ-ластикатку	0,54	0,7	7000	165,0	204,0	27,9
Фільтрувальний одяг	0,93	0,97	87 600	4 500,0	4 810,0	6,1

За результатами розрахунків побудовано залежності, наведені на рис. 3, 4.

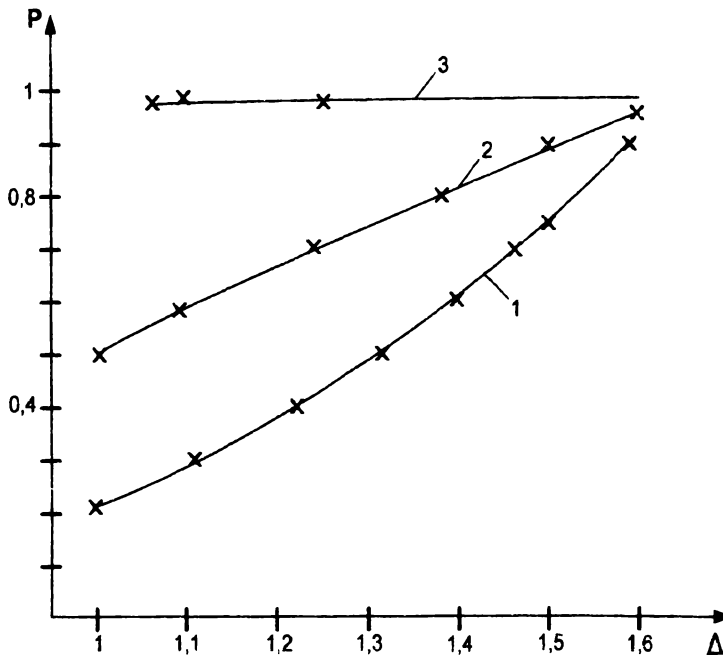


Рис. 3. Залежність індексу вартості $\Delta=(C_2/C_1)$ під час підвищення надійності:

1 – разовий одяг; 2 – ізолювальний одяг з ПВХ-пластикату; 3 – фільтрувальний одяг

З рис.3 випливає, що під час вибору заходів з підвищення надійності початкова вартість виробу не може зростати більш як на 60%.

Величина економії, яку отримує споживач виробів, залежить від терміну окупності виробів з відповідним рівнем надійності (рис. 4).

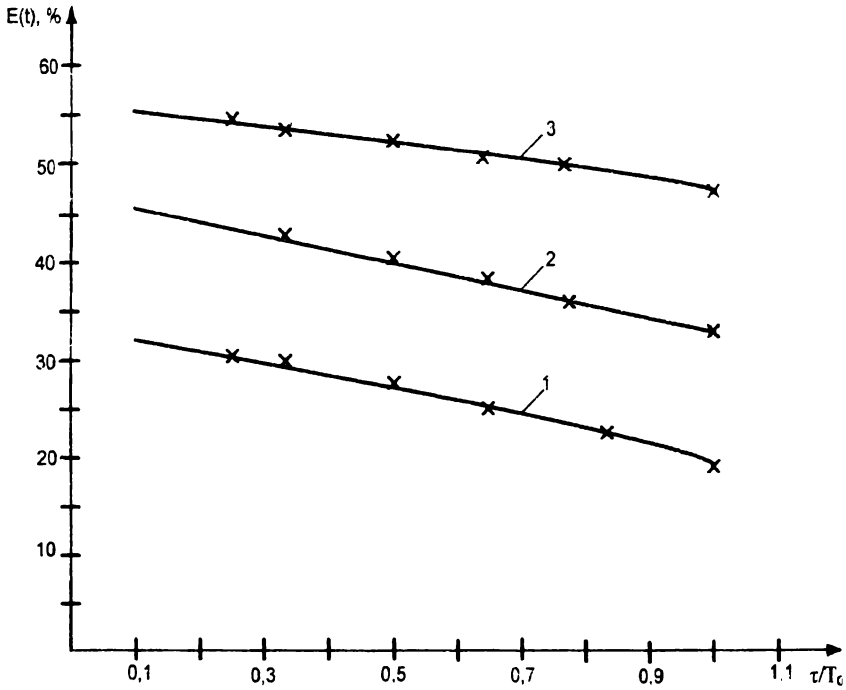


Рис. 4. Залежність нормованої економії $E''(t) = E(t) / A \cdot C_1$ від співвідношення τ/T_0 для ізолювального одягу:

1 – рівень надійності $P_2(t) = 0,7$; 2 – рівень надійності $P_2(t) = 0,8$; 3 – рівень надійності $P_2(t) = 0,9$

Додаткові витрати, які визначають такі реальні характеристики, залежать від способів підвищення надійності та потенційних можливостей ефективною реалізації їх на конкретному підприємстві. З огляду на отримані результати підприємство – виробник захисного одягу, який розглянуто в прикладі, впровадило такі зміни в межах отримання економічно доцільної вартості:

1. Під час виготовлення разового комбінезону застосовано матеріал з підвищеними ФМХ (табл. 2), для швів використовують ниткове з'єднання з подальшою їх герметизацією.

Таблиця 2. Фізико-механічні характеристики матеріалів

Вид одягу	Варіант розробки	Стійкість до розривання матеріалу, H уздовж/упоперек	Стійкість до розривання швів, H уздовж/упоперек	Стійкість до роздирання матеріалу, H уздовж/упоперек	Стійкість до проколювання, H
Фільтрувальний	1	326/242	221/224	15,0/22,0	23,3
	2	1126/745	510/489	54,0/52,0	23,5
Разовий	1	130/143	65/75	26,1/30,6	10,8
	2	200/210	130/140	37,9/54,5	22,9
Ізолювальний	1	180/160	126/100	12,0/10,0	3,7
	2	180/160	162/155	12,0/10,0	3,7

2. У фільтрувальному одязі проведено заміну матеріалу зовнішнього шару (табл. 2.)

3. В ізолювальному одязі внесено зміни в конструкцію: використано спущену пройму в куртці, шви – прямокутні.

Застосування матеріалів і швів з'єднання з поліпшеними ФМХ суттєво впливає на показники надійності і забезпечує зміну вартості виробу у визначеному діапазоні.

Висновки

1. Здійснено класифікацію заходів з підвищення надійності сучасних ЗІЗ. Встановлено, що вибір способів підвищення надійності ЗІЗ є технічною та економічною проблемою.

2. Запропоновано математичну модель надійності, яка дає змогу оцінити ефективність проведення заходів з підвищення надійності за техніко-економічним показникам.

3. Наведено алгоритм розрахунку для невідновлюваних ЗІЗ під час підвищення надійності за рахунок зменшення інтенсивності відмов на стадіях проектування і виготовлення.

4. Результати досліджень і розрахунків виявили, що найефективнішими заходами з підвищення надійності спеціального захисного одягу є використання матеріалів і швів з підвищеними фізико-механічними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воробьев В.Д., Карнаух Н.Н., Руринкевич В.Б., Сорокина Т.Ю. и др Средства индивидуальной защиты работников (классификация, качество, гармонизация нормативных документов). – К.: НИИОТ, 2005. – 83 с.
2. Литвиненко Г.Є., Яцишина Л.К., Малова Т.Л., Константинов С.М. Моделирование і оптимізація технологічних процесів. – К.: Вища школа, 2001. – 252 с.
3. Білоусова Г.Г., Колосніченко М.В., Масловська Л.О. др. Методи обробки швейних виробів. – К.: МВЦ «Медінформ», 2007. – 292 с.
4. Князев А.Д. Элементы теории надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: МЭИ, 1988. – 114 с.
5. Ллойд Д.К., Липов М, Надежность. – М.: Советское радио, 1964. – 686 с.
6. 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.: ННДЮП. – 2004. – № 7. – с. 3–5.

Надійшла 18.09.2008