

Ігнаткін В. У.¹, Литвиненко В. А.², Олійник Л. В.³, Томашевський О. В.⁴, Шпаковський О. Ю.⁵¹Д-р техн. наук, професор, Дніпродзержинський державний технічний університет, Україна²Канд. техн. наук, ст. викладач, Дніпродзержинський державний технічний університет, Україна³Пошукач, Дніпродзержинський державний технічний університет, Україна⁴Канд. техн., наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна, E-mail: tms@zstu.zaporizhzhie.ua⁵Главний метролог, Придніпровська залізнична дорога, Україна

МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Зроблена формалізація процесів експлуатації і метрологічного обслуговування засобів виміральної техніки на промислових підприємствах. Для оптимізації параметрів систем метрологічного обслуговування використано метод ненаправленого випадкового пошуку Монте-Карло. Проведено оптимізацію сумарних витрат на метрологічне обслуговування на основі дискретно-безперервної моделі експлуатації засобів виміральної техніки.

Ключові слова: моделювання методом Монте-Карло, багатопараметрична оптимізація, датчики псевдовипадкових чисел, метрологічне обслуговування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Системи управління якістю продукції є основною частиною виробничого процесу і направлені не стільки на виявлення дефектів або браку в готовій продукції, скільки на перевірку якості виробу в процесі його виготовлення. Головними труднощами при аналізі виникнення дефектів та браку є мала вивченість властивостей і закономірностей виникнення явних і метрологічних відмов в засобах виміральної техніки (ЗВТ), відсутність необхідного математичного апарату, звідси хаотичність та недостатня достовірність інформаційних потоків про якість. Перераховані труднощі визначаються станом контролю-виміральної техніки і недостатнім рівнем метрологічного забезпечення.

Робота метрологічної служби (МС) промислових підприємств направлена на вирішення задач з метрологічного обслуговування ЗВТ (МО ЗВТ) на стадії їх експлуатації. Оптимізація і автоматизація розв'язку задач МО ЗВТ полягає в виборі значень параметрів системи МО ЗВТ, які б забезпечували компроміс між втратами від виробництва бракованої продукції і витратами на МО ЗВТ, тобто в досягненні мінімуму загальних втрат виробництва.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Приведемо базові моделі процесу експлуатації і МО ЗВТ, які оперують ймовірністю знаходження ЗВТ в кожному з десяти можливих станів, при цьому розглядається тільки стаціонарний випадок. Згідно з [1], маємо початкове диференціальне рівняння процесу переходу ЗВТ із одного стану в інший:

$$\frac{d}{dt}P = L \cdot P, \quad (1)$$

де $P = (P_1, P_2, P_3, \dots, P_{10})^T$ – вектор ймовірностей станів, L – матриця інтенсивностей переходів λ_{ij} ЗВТ з i -го в j -й стан (10×10).

Зміст станів наступний: P_1 – ЗВТ застосовується за призначенням, знаходячись в працездатному стані; P_2 – ЗВТ застосовується за призначенням з прихованою відмовою; P_3 – ЗВТ готується до відновлення, знаходиться в непрацездатному стані; P_4 – проводиться відновлення непрацездатного ЗВТ; P_5 – перевірка працездатного ЗВТ; P_6 – ЗВТ готується до відновлення, знаходячись в працездатному стані (підготовка до помилкового ремонту); P_7 – проводиться перевірка непрацездатного ЗВТ; P_8 – виконується самоперевірка непрацездатного ЗВТ; P_9 – проводиться відновлення працездатного ЗВТ.

В стаціонарному випадку $\frac{d}{dt}P = 0$, тому (1) можна представити в вигляді матричного рівняння, яке з урахуванням умови нормування

$$\sum_{i=1}^{10} P_i = 1, \quad (2)$$

записують

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{1,1} & \dots & \lambda_{1,10} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \lambda_{1,10} & \dots & \lambda_{10,10} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{10} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де змінні λ_{ij} у свою чергу залежать від компонент вектора параметрів математичної моделі (1) зміст яких наступний: λ_y – інтенсивність явних відмов; λ_m – інтенсивність метрологічних відмов; λ_p – інтенсивність надходження ЗВТ в ремонт; λ_{pl} – інтенсивність надходження в ремонт з помилковою відмовою; λ_{el} – інтенсивність надходження непрацездатних ЗВТ в ремонт; τ – міжповірочний інтервал (годин); τ_c – тривалість самоперевірки (годин); τ_{en} – періодичність самоперевірки (годин); $T_{рем}$ – тривалість ремонту (годин); $T_{нов}$ – тривалість перевірки

(годин); α_c, α_n – ймовірність помилок самоперірки і перевірки 1-го роду; β_c, β_n – ймовірність помилок самоперірки і перевірки 2-го роду; β_p – ймовірність помилки регулювання при відновленні (ремонті) 2-го роду.

Для компонент даного вектора виконуються наступні умови

$$(\forall i \in \{1, 2, \dots, 15\} [M_i > 0]) \text{ і}$$

$$\alpha_c < 1, \alpha_n < 1, \beta_c < 1, \beta_p < 1, \beta_n < 1.$$

Властивості рівняння (3) і методи визначення та аналізу вектора ймовірності станів \bar{P} детально висвітлені в роботах [1, 2]. При чисельному розв’язку матричного рівняння були застосовані алгоритм виключення Гаусса та розв’язок за допомогою процедур псевдообернення матриць, можуть бути також застосовані операції з розрідженими матрицями.

Альтернативою розглянутій марківській моделі експлуатації і МО ЗВТ є дискретно-безперервна модель. Формалізація процесу МО ЗВТ на основі цього підходу полягає в наступному: $p_{1,k}$ і $p_{2,k}$ – ймовірності виявити ЗВТ відразу після k -ої перевірки відповідно в станах 1 (робота ЗВТ без відмов) або 2 (робота ЗВТ з метрологічною відмовою). Ймовірність $p_{-m,k}(t)$ того, що в інтервалі часу

$$\tau_n + kT_n \leq t < \tau_n + (k+1)T_n$$

ЗВТ буде працювати без відмов, і ймовірність $p_{m,k}(t)$ того, що в тім же інтервалі часу в ЗВТ виникає прихована відмова:

$$p_{-m,k}(t) = p_{1,k} \frac{1 - p_m(t)}{1 - p_m(\tau_n + kT_n)} \times \frac{1 - p_{\text{я}}(t)}{1 - p_{\text{я}}(\tau_n + kT_n)}; \quad (4)$$

$$p_{m,k}(t) = \left\{ p_{2,k} + p_{1,k} \left(1 - \frac{1 - p_m(t)}{1 - p_m(\tau_n + kT_n)} \right) \right\} \times \frac{1 - p_{\text{я}}(t)}{1 - p_{\text{я}}(\tau_n + kT_n)}; \quad (5)$$

де τ_n, T_n – час і період проведення перевірки ЗВТ, $p_m(\dots)$ і $p_{\text{я}}(\dots)$ – ймовірності виникнення в ЗВТ метрологічних і явних відмов відповідно до моменту часу, наведеному в дужках. Функція $p_{-m,k}(t)$ є не що інше, як ймовірність залишитися ЗВТ в стані 1 в момент часу t , а функція $p_{m,k}(t)$ – ймовірність залишитися ЗВТ в стані 2 до моменту часу t . Обидві ймовірності падають із часом через наростання ймовірності виникнення явної відмови – множник

$$(1 - p_{\text{я}}(t)) / (1 - p_{\text{я}}(\tau_n + kT_n)).$$

Математичне очікування часу знаходження ЗВТ t_j в деякому стані j визначається [2]:

$$t_j = \int_0^{\infty} \xi \frac{\partial p_j(\xi)}{\partial \xi} d\xi = - \int_0^{\infty} \xi \frac{\partial p_i(\xi)}{\partial \xi} d\xi, \quad (6)$$

де $p_j(\xi)$ – ймовірність залишитися ЗВТ в j -му стані до моменту часу ξ .

В задачах оптимізації параметрів МО ЗВТ частина параметрів (компонент вектора M) є варіюваним. У загальному випадку вважають заданою деяку множину векторів $SM = \{M\}$, по яких і шукається оптимальне в деякому розумінні рішення.

В якості критерію оптимальності приймають найменше значення цільової функції:

$$F(M) = W \cdot P(M), \quad (7)$$

що є скалярним добутком векторів $P(M)$ і W , де $W = (w_1, \dots, w_{10})$. Коефіцієнти w_i визначають вагу ймовірності кожного з десяти станів в цільовій функції.

Таким чином, необхідно знайти вектор параметрів моделі $M_o \in SM$, такий, що на відповідному йому векторі ймовірності $P(M)$, одержаним як рішення рівняння (3), цільова функція (7) приймає найменше значення і виконуються накладені обмеження на модель експлуатації ЗВТ.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛІ СТАТТІ

Покажемо деякі прийоми вибору оптимальних значень параметрів МО ЗВТ за допомогою методу Монте-Карло (ненаправлений випадковий пошук). Задача оптимізації параметрів МО ЗВТ в даному випадку запишеться

$$\left. \begin{aligned} CF(\alpha_n, \beta_n, \tau, T_{\text{нов}}, T_{\text{рем}}, \nu) &\Rightarrow \min \\ K_{\Gamma}(\alpha_n, \beta_n, \tau, T_{\text{нов}}, T_{\text{рем}}, \nu) &\geq K_{\Gamma}; \\ 0 \leq P_i < 1; \quad 0 < \alpha_n < 1; \quad 0 < \beta_n < 1; \\ 0 < \beta_p < 1; \quad \sum_{i=1}^{10} P_i &= 1; \quad i = 1, \dots, 10. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В залежності від прийнятої моделі експлуатації і поставлених задач (8) може мати різні модифікації.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Параметри, які підлягають процедурі оптимізації, позначимо $\pi = |\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m|$, а фіксовані $\nu = |\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m|$. Цільова функція $CF(\pi, \nu)$ – функція сумарних відносних витрат на експлуатацію і ремонт ЗВТ. Відносні витрати приймались в умовних одиницях(у.о): витрати на застосування ЗВТ (C_{11}, C_{22}), самоперірку ($C_{88}, C_{10,10}$), витрати на перевірку (C_{55}, C_{77}) і помилковий ремонт (C_{99}) – 10 у.о; витрати на ремонт (C_{44}) – 30 у.о. транспортування ($C_{15}, C_{27}, C_{34}, C_{51}, C_{63}, C_{72}, C_{95}$) – рівні 1 у.о. вартості. Позначимо вектор параметрів $\theta = [\pi, \nu]$, тоді згідно з моделлю (2)

$$CF = \sum_{i=1}^{10} C_i P_i(\theta) + \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} C_{ij} P_i(\theta) \lambda_{ij}(\theta).$$

Метод випадкового ненаправленого пошуку полягає в дослідженні розв'язків для однієї з базових моделей експлуатації і МО ЗВТ вибіркою об'ємом N незалежно розподілених псевдовипадкових чисел a_l^k , де l – номер параметра, який підлягає оптимізації, а $k = 1, 2, \dots, N$. Вводяться мінімальні і максимальні значення оптимізуємих параметрів, на основі послідовності a_l^k будується сукупність незалежних випадкових векторів параметрів π_l^k для знаходження оптимуму цільової функції

$$\begin{aligned} \pi^{(1)} &= (\alpha_n^{(1)}, \beta_n^{(1)}, \tau^{(1)}, T_{нов}^{(1)}, T_{рем}^{(1)}); \\ \pi^{(2)} &= (\alpha_n^{(2)}, \beta_n^{(2)}, \tau^{(2)}, T_{нов}^{(2)}, T_{рем}^{(2)}); \\ &\dots \\ CF(\pi, v): \pi^{(k)} &= (\alpha_n^{(k)}, \beta_n^{(k)}, \tau^{(k)}, T_{нов}^{(k)}, T_{рем}^{(k)}); \\ &\dots \\ \pi^{(N)} &= (\alpha_n^{(N)}, \beta_n^{(N)}, \tau^{(N)}, T_{нов}^{(N)}, T_{рем}^{(N)}). \end{aligned}$$

Важливою задачею при застосуванні даного підходу є генерація вектору випадкових чисел заданого об'єму вибірки N рівномірно розподілених на інтервалі $(0, 1)$.

Відомо декілька способів отримання цих чисел, причому ці способи можна розділити на три великі групи: отримання випадкових чисел за допомогою таблиць [4]; за допомогою апаратних генераторів випадкових чисел (фізичний спосіб); з використанням математичних алгоритмів (математичний спосіб).

Основним недоліком датчиків псевдовипадкових чисел, реалізованих програмно на ЕОМ, являється обмежений запас чисел, оскільки в достатньо великій послідовності псевдовипадкових чисел (від декількох тисяч до декількох сотень тисяч, залежно від способу отримання) можуть зустрічатися послідовності чисел, що повторюються.

Для проведення розрахунків авторами був використаний датчик псевдовипадкових чисел [3], який відноситься до класу лінійних конгруентних генераторів (період $2^{19937-1}$).

В табл. 1 приведено порівняння результатів розв'язку задачі пошуку комбінації оптимальних параметрів МО ЗВТ за допомогою евристичного методу ціленаправленого перебору і випадкового пошуку. Розрахунки були проведені для випадку:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 0,001 \text{ год}^{-1}; \lambda_M = 0,002 \text{ год}^{-1} \lambda_p = 3,5 \cdot 10^4 \text{ год}^{-1}, \\ \lambda_{pl} &= 10^{-3} \text{ год}^{-1} \lambda_{el} = 2 \cdot 10^3 \text{ год}^{-1}, \tau_c = 0,1 \text{ год}, \\ \tau_{cn} &= 5 \text{ год}, \alpha_c = 0,01, \beta_c = 0,2, \beta_p = 0,25. \end{aligned}$$

Значення оптимізуємих параметрів варіювались в межах: $\alpha_n = 0,001 \div 0,2$, $\beta_n = 0,001 \div 0,3$, $\tau = 8 \cdot 10^3 \div 50 \cdot 10^4$, $T_{нов} = 1 \div 10 \text{ год}$, $T_{рем} = 3 \div 30 \text{ год}$.

Для дослідження даної моделі було проведено моделювання для об'ємів вибірки $N \in [1000, 100000]$ псевдовипадкових чисел рівномірно розподілених в інтервалі $U(0,1)$.

Таблиця 1. Результати дослідження задачі вибору оптимальних параметрів МО ЗВТ

| Вектор вихідних даних розрахунків | Алгоритми оптимізації | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| | Ціленаправлений перебір | Випадковий пошук | |
| | | $N = 10000$ | $N = 100000$ |
| $\min(CF^{(k)})$ | 1,1072 | 0,7815 | 0,7806 |
| K_{Γ} | $\geq 0,8$ | 0,9867 | 0,9870 |
| α_n | 0,10 | 0,0012 | 0,0015 |
| β_n | 0,05 | 0,1551 | 0,1201 |
| τ (год.) | $3,94 \cdot 10^4$ | $1,2685 \cdot 10^3$ | $1,4032 \cdot 10^3$ |
| $T_{нов}$ (год.) | 1 | 4,4620 | 2,9844 |
| $T_{рем}$ (год.) | 4 | 3,9049 | 3,1112 |

Розглянемо інший приклад розв'язку задачі оптимізації параметрів МО ЗВТ на основі дискретно-безперервної моделі експлуатації ЗВТ. В якості критерію оптимізації приймають суму витрат на МО і втрати від застосування ЗВТ з метрологічною відмовою. В цьому випадку скористаємося цільовою функцією виду

$$C_{ЗВТ} = \frac{1}{K_{ТВ}} (C_{ЗВТ} + (C_n t_{34} + C_p \tau_p + C_{ш} t_2) / T_{ц}), \tag{9}$$

де $K_{ТВ}$ – коефіцієнт технічного використання $C_{ЗВТ}$ – вартість 1-ї години експлуатації ЗВТ в користувача без обліку витрат на МО ЗВТ (у.о./год.); C_n – вартість 1 години повірочних робіт (у.о./год.); C_p – вартість 1 години ремонтних робіт (у.о./год.); $C_{ш}$ – штраф за експлуатацію ЗВТ з метрологічною відмовою (у.о./год.); t_{34} – математичне очікування часу перебування ЗВТ на повірці за час життєвого циклу $T_{ц}$; t_2 – математичне очікування часу роботи ЗВТ з метрологічною відмовою за час $T_{ц}$. На рис. 1 зображена поверхня цільової функції для 40 значень T_m і T_n (логарифмічний масштаб). Дослідження показують, що для такого класу функцій можна застосувати класичні градієнтні методи або модифікації симплекс-методу Нелдера-Міда. Метод Монте-Карло для функцій двох змінних дає невелику точність обчислень (5–10%) [4]. Наприклад, функція Розенброка має мінімум в точці $[1, 1]$, результати, отримані методом статистичних випробувань при $N=20000$, дають точку $[x_1=0,9461, x_2=0,8986]$, а значення функції $f_{rb.min}=0,0041$. Але коли потрібно розв'язувати задачу умовної оптимізації для 5-ти і більше параметрів застосування методів випадкового ненаправленого пошуку виявляються єдиним шляхом отримання чисельного розв'язку.

Приклад. Проектується система МО ЗВТ для групи однотипних приладів з наступними характеристиками надійності і параметрами МО ЗВТ: $T_m = 5000 \text{ год}$, $v_m = 0,7$, $T_n = 10000 \text{ год}$, $\tau_e = 48 \text{ год}$ (час відновлення ЗВТ в ремонті), $\beta_p = 0,25$. Потрібно знайти вектор оптимальних параметрів $optpar = \text{var}(\alpha_n, \beta_n, T_n, T_{рем}, \tau_n)$, при якому $C_{ЗВТ}(optpar) \Rightarrow \min$.

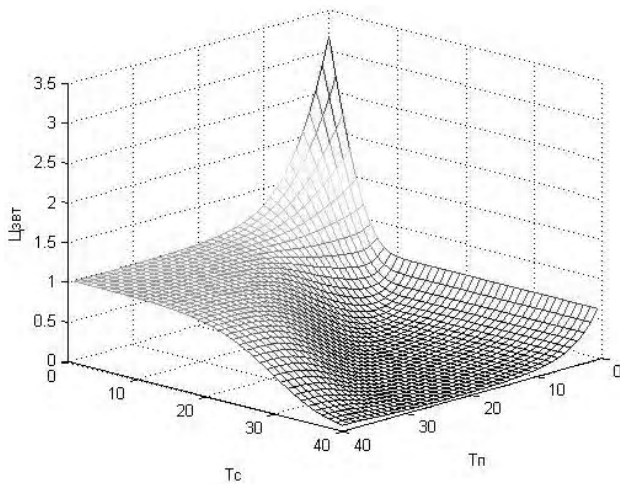


Рис. 1. Поверхня цільової функції як функції від двох змінних $C_{ЗВТ} = f(T_n, T_M)$ для випадку дифузійно-монотонної моделі метрологічних відмов при коефіцієнті варіації $v_M=1$

В якості моделі експлуатації ЗВТ приймається дискретно-безперервна модель 5-ти основних станів і критерій оптимізації (9). Розрахунки проводились в припущенні дифузійно-монотонної моделі метрологічних відмов $p_M(t) = DM(t, T_M, v_M)$ і експоненціальної моделі явної відмови $p_Y(t) = \exp(t, T_Y)$, при обмеженні на коефіцієнт готовності $K_G \geq 0,8$. Границі варіювання, крім $T_n = 4,5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4$, взяті з попереднього прикладу. Проведені статистичне випробування для $N=30000$ з використанням в якості датчика псевдовипадкових чисел алгоритм показали, що при проектуванні системи МО обраної групи ЗВТ на підприємстві, необхідно встановити наступні значення параметрів системи МО ЗВТ:

$$\alpha_{n,opt.} = 0,0775;$$

$$\beta_{n,opt.} = 0,0093;$$

$$T_{n,opt.} = 4,5072 \cdot 10^3 \text{ год.};$$

$$\tau_{n,opt.} = 2,5101 \text{ год.};$$

$$T_{рем,opt.} = 3,1889 \text{ год.}$$

При цих параметрах буде забезпечений мінімум сумарних витрат на експлуатацію і МО ЗВТ ($C_{ЗВТ \min} = 0,1706$ при $C_{ЗВТ} = 0,025$, $C_n = 1,4$, $C_p = 3$, $C_{ui} = 1$) з рівнем метрологічної надійності $K_D = 0,8588$.

З метою прикладного застосування, на основі проведених досліджень, розроблені інформаційно-мережна технологія програмних засобів і рекомендації щодо автоматизованого розв'язку задач оцінки і аналізу експлуатаційної надійності ЗВТ з наступним вибором оптимальних значень параметрів СМО ЗВТ.

Розроблений модуль орієнтований на розв'язок трьох основних задач: 1 – оцінка фактичного стану (на даний

момент часу) рівня надійності груп однотипних ЗВТ. Розрахунок значень показників надійності ЗВТ проводять для призначеного на підприємстві міжповірочних інтервалів (МПП) при фіксованих інших параметрах МО ЗВТ (рис. 2); 2 – будуються залежності показників надійності і цільової функції від періоду проведення повірочних робіт; 3 – враховуючи значення цільової функції і обмеження виробництва на показники надійності ЗВТ, призначати оптимальні (у визначеному змісті) МПП, як індивідуальні, так і для груп однотипних приладів. Слід додати, що дану процедуру можна використовувати для дослідження впливу параметрів якості обслуговування і ремонту на показники надійності, а також доповнити функціями 3-D візуалізації, для побудови поверхні цільової функції двох аргументів (T_n , T_M) і процедурою вибору оптимальної комбінації параметрів СМО ЗВТ.

Локальний оптимум цільової функції не завжди може служити критерієм для вибору МПП, при наявності обмежень на коефіцієнти експлуатаційної надійності ЗВТ. В зв'язку з цим, для дослідження залежності рівня надійності груп однотипних ЗВТ від параметрів СМО ЗВТ запропоновано метод сканування графіків функцій показників надійності ЗВТ, який полягає в наступному: будуються графіки залежностей від періоду T_n наступних величин: t_1/T_Y , K_G , K_D , $K_{ТВ}$, T_{MP} , T_{MP}/T_Y і $C_{ЗВТ}$. Після розрахунків залежностей і виводу графіків на екран, користувач в діалоговому режимі встановлює горизонтальний покажчик (динамічне середовище сканування графіків) в точку мінімуму цільової функції. Горизонтальний покажчик перетинає графіки залежностей і виводить на екран значення показників надійності в точках перетину (рис. 3). Переміщаючи покажчик, користувач з заданою частотою дискретизації діапазону зміни T_n коригує МПП в області оптимальних значень, при наявності обмежень на показники надійності, або при фіксованому МПП вирішує задачу оцінки фактичного рівня надійності ЗВТ. Поле «Номер закону розподілу метрологічних відмов» включає функцію «select», за допомогою якої користувач обирає потрібний вид закону розподілу для однотипних ЗВТ: 1 – експоненціальний розподіл; 2 – дифузійно-монотонний; 3 – дифузійно-немонотонний.

Розроблена процедура дозволяє ефективно проводити кількісний аналіз рівня експлуатаційної надійності парку ЗВТ сучасних промислових підприємств і визначати оптимальну періодичність (за критеріями експлуатаційної надійності і визначеного показника економічної ефективності МО ЗВТ) проведення повірочних і ремонтних робіт, а також попередній аналіз можливих комбінацій параметрів СМО ЗВТ в інтерактивному режимі АРМ метролога.

На основі вхідних даних розглянутої процедури (рис. 3) розв'язана задача вибору оптимальних значень параметрів СМО ЗВТ методом Монте-Карло.

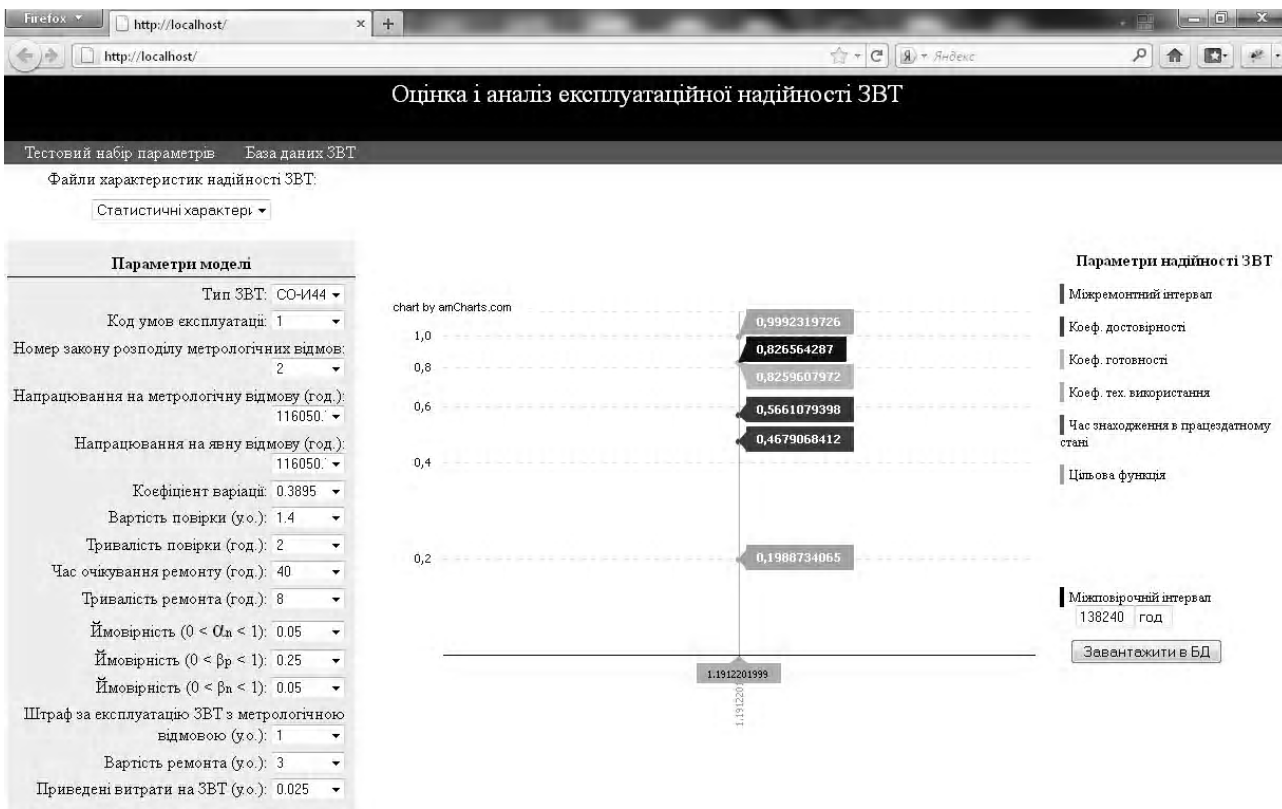


Рис. 2. Оцінка фактичного стану рівня надійності ЗВТ

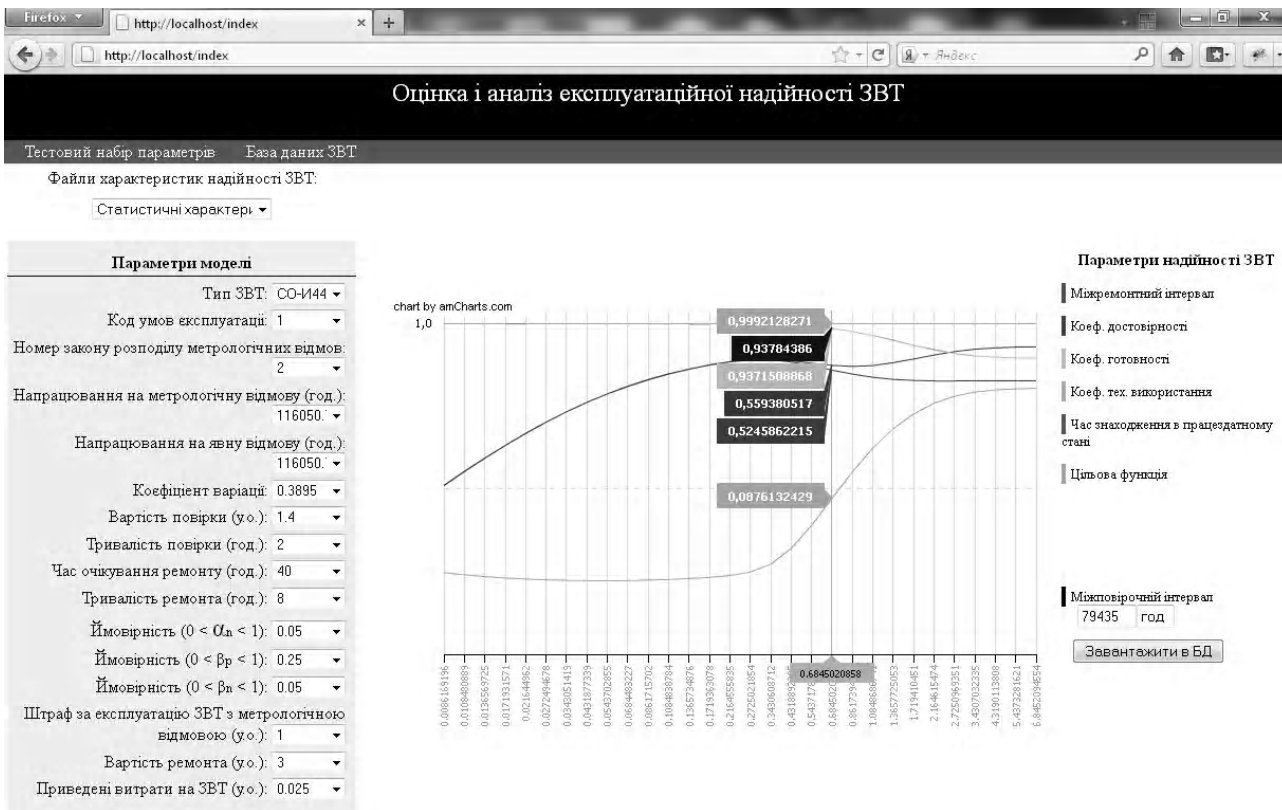


Рис. 3. Аналіз залежностей показників надійності і вибір оптимального МПП

Пошук оптимальної комбінації параметрів СМО ЗВТ виконувався за допомогою алгоритму випадкового не-направленого пошуку. В якості генератора випадкових чисел використаний математичний датчик псевдовипадкових чисел «Mersenne Twister», який відносяться до класу лінійних конгруентних генераторів (період гамми $(2^{19937}-1)/2$) [3].

Наприклад, при об'ємі статистичних випробувань $N=10^5$, діапазон варіювання параметрів СМО ЗВТ: $\alpha_{\Pi}=\beta_{\Pi}=0,05 \div 0,2$, $\beta_P=0,25 \div 0,35$, $\tau_{\Pi}=1 \div 6$, $\tau_P=3 \div 8$; $T_{\Pi} = 8 \times 10^4 \div 1,6 \times 10^5$, вектор комбінації оптимальних параметрів СМО ЗВТ $\pi = [0,0583, 0,0508, 0,2535, 8,0203e^{-04}, 2,5244, 6,4182]^T$ при цьому значення цільової функції $CF^{(k)} = 0,0602$ при рівні технічної надійності $K_T=0,9645$, $K_{TB}=0,9651$ (коефіцієнт технічного використання ЗВТ за час життєвого циклу T_{Π}) і метрологічної $K_D = 0,9651$, що підтверджує ефективність розроблених процедур і достовірність отриманих результатів.

Для оцінки економічної ефективності від підвищення якості сукупності вимірювань необхідно провести дослідження впливу метрологічної складової надійності ЗВТ на якість продукції. Для розрахунку використаємо дані статистичних досліджень груп однотипних ЗВТ, які приведені в роботі [5] для промислових підприємств.

Сумарні втрати від браку по причині метрологічних відмов в ЗВТ виражаються:

$$C^{br} = \sum_{j=1}^{M_T} (1 - K_{D_j}) \sum_{k=1}^{P_{PM}} q_{jk} \cdot P_k \cdot C_{jk}^{br}$$

де K_{D_j} – коефіцієнт достовірності j -ї групи однотипних приладів, q_{jk} – величина, яка вказує тип і кількість ЗВТ кожного типу на робочому місці деякого типу, C_{jk}^{br} – штрафні коефіцієнти застосування даного типу ЗВТ з метрологічною відмовою на визначеному типі робочого місця (втрати від браку, визначаються типом конкретного виробництва). Всі величини вартості для зручності обчислень будемо виражати в умовних одиницях (у. о.), що при необхідності дозволить перевести дані величини в необхідні грошові одиниці. В табл. 2 приведені загальні характеристики надійності 5-ти груп однотипних ЗВТ, де T_M, σ_M – середнє значення і середньоквадратичне напруження на метрологічну відмову, $T_{Я}$ – середнє значення напруження на явну відмову.

Таблиця 2.

| j | T_M , год. | $\frac{\sigma_M}{T_M}$ | $T_{Я}$, год. |
|-----|--------------|------------------------|----------------|
| 1 | 112320 | 0,94 | 112320 |
| 2 | 23414 | 0,72 | 100000 |
| 3 | 31968 | 1,35 | 100000 |
| 4 | 34905 | 1,08 | 150000 |
| 5 | 37670 | 1,37 | 150000 |

Діаграма на рис. 4 ілюструє однакову динаміку впливу метрологічної надійності на якість продукції для введених в розгляд критеріїв економічної ефективності при різних варіантах розрахунку і оптимізації метрологічної надійності ЗВТ: а) $C^{br} = [51543; 22401; 88227; 62118; 37646]$; б) $CF_{DNsum} = [0,7049; 0,3801; 1,1111; 0,8206; 0,5504]$ (цільова функція сумарних втрат від застосування ЗВТ з метрологічною і витрат на метрологічне обслуговування).

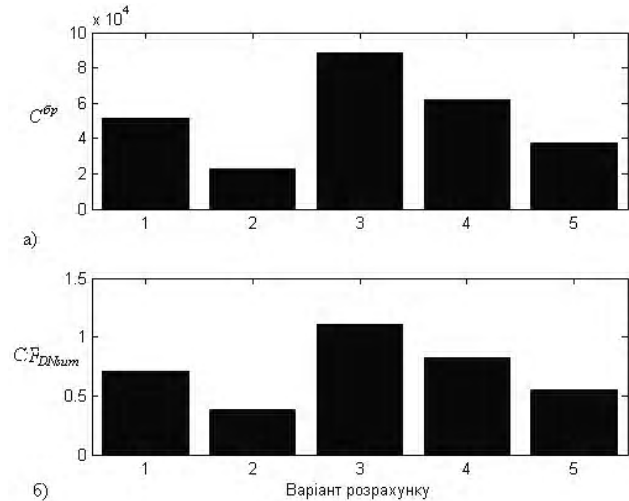


Рис. 4. Дослідження критеріїв економічної ефективності СМО ЗВТ

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження показали шляхи отримання чисельного розв'язку для задач багатопараметричної оптимізації МО на основі моделей експлуатації ЗВТ методом Монте-Карло. Модифікації марковської моделі рекомендується застосовувати при апіорному аналізі системи МО ЗВТ, а дискретно-безперервну для динамічного коригування параметрів МО ЗВТ. При достатній кількості випробувань і застосуванні сучасних методів генерації псевдовипадкових чисел оптимальне значення цільової функції сумарної вартості МО ЗВТ може бути знайдено за допомогою алгоритмів випадкового пошуку.

На основі технологій програмування інформаційних мереж запропонована методика сканування функцій показників надійності ЗВТ, що дозволило автоматизувати розв'язок задач оцінки і аналізу рівня експлуатаційної надійності ЗВТ, вибору оптимального МПІ.

Розроблені програмні засоби можуть бути адаптовані для роботи в складі функціонуючих на сьогоднішній день АСУ МО ЗВТ для вирішення задач діагностики і моніторингу надійності ЗВТ, оптимізації параметрів СМО ЗВТ на різних рівнях державних метрологічних служб і підрозділів підприємств.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Застосування моделей теорії масового обслуговування для розв'язку задачі прогнозування надійності ЗВТ / [Ігнаткін В. У., Віткін Л. М., Литвіненко В. А., Білий О. І.] // *Метрологія та прилади*. – 2011. – № 2 (28). – С. 45–50.
2. Деякі питання оптимізації параметрів системи метрологічного обслуговування засобів виміральної техніки / Ігнаткін В. У., Віткін Л. М., Литвіненко В. А., Білий О. І. // *Український метрологічний журнал*. – 2011. – № 1. – С. 11–15.
3. Matsumoto, M. and Nishimura, T. «Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator», *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, (1998), 8(1):3-30.
4. Ігнаткін, В. У. Розв'язок задачі вибору оптимальних параметрів метрологічного обслуговування засобів виміральної техніки методом Монте-Карло / Ігнаткін В. У., Литвіненко В. А., Білий О. І. // *Зб.наук. пр. ДДТУ*. – 2012. – Вип. 1(18). – С. 72–79.
5. Ігнаткін, В. У. Особливості автоматизації метрологічного обслуговування ЗВТ промислових підприємств / [Ігнаткін В. У., Віткін Л. М., Литвіненко В. А., Білий О. І.] // *Метрологія та прилади*. – 2010. – № 1. – С. 49–52.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2014.

Ігнаткін В. У.¹, Литвіненко В. А.², Олейник Л. В.³, Томашевський А. В.⁴, Шпаковський А. Ю.⁵¹Д-р техн. наук, професор, Днепродзержинський державний технічний університет, Україна²Канд. техн. наук, ст. преподаватель, Днепродзержинський державний технічний університет, Україна³Соискатель, Днепродзержинський державний технічний університет, Україна⁴Канд. техн. наук, доцент, Запорозький національний технічний університет, Україна⁵Главный метролог, Приднепровская железная дорога, Україна

МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ МЕТРОЛОГІЧЕСЬКОГО ОБСЛУЖИВАННЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Сделана формализация процессов эксплуатации и метрологического обслуживания средств измерительной техники на промышленных предприятиях. Для оптимизации параметров систем метрологического обслуживания использован метод ненаправленного случайного поиска Монте-Карло. Проведена оптимизация суммарных затрат на метрологическое обслуживание на основе дискретно-непрерывной модели эксплуатации средств измерительной техники.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, многопараметрическая оптимизация, датчики псевдослучайных чисел, метрологическое обслуживание.

Ignatkin V.¹, Litvinenko V.², Olejnik L.³, Tomashevskiy A.⁴, Shpakovskiy A.⁵¹Doctor of Sciences, Professor, Dniprodzerzhynsk state technical university, Ukraine²Doctor of Philosophy, Senior lecturer, Dniprodzerzhynsk state technical university, Ukraine³Candidate for degree, Dniprodzerzhynsk state technical university, Ukraine⁴Doctor of Philosophy, Senior lecturer, Zaporizhzhya national technical university, Ukraine⁵Chief-metrologist, Pridniprovska railroad, Ukraine

MODELS OF METROLOGICAL SERVICES PROCESSES OF MEASURING EQUIPMENT

Formalization of the processes of exploitation and metrological service of facilities of measuring technique is done on the industrial enterprises. Certain ways of receipt of numeral decision for tasks many self-reactance optimizations of metrology service on the basis of models of exploitation of facilities of measuring technique. For optimization of parameters of the systems of metrology service the method of nondirectional random search of Monte Carlo is used. Optimization of total expenses is conducted on metrology service on the basis of discretely-continuous model of exploitation of facilities of measuring technique.

Keywords: Monte Carlo simulation, a multiparametric optimization, sensors pseudorandom numbers, and metrological service.

REFERENCES

1. Ignatkin V. U., Vitkin L. M., Litvinenko V. A., Bilyi O. I. Zastosuvannya modeley teorii masovogo obslugovuvannya dlya rozv'yazku zadachi prognuzuvannya nadiynosti ZVT, *Metrologiya ta prylady*, 2011, No. 2 (28), pp. 45–50.
2. Ignatkin V. U., Vitkin L. M., Litvinenko V. A., Bilyi O. I. Deyaki pytannya optimizatsii parametriv systemy metrologichnogo obslugovuvannya zasobiv vimiryalnoi tehniky, *Ukrainskyi metrologichnyi zhurnal*, 2011, No. 1, pp. 11–15.
3. Matsumoto M. and Nishimura T. «Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator», *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, (1998), 8(1):3-30.
4. Ignatkin V. U., Litvinenko V. A., Bilyi O. I. Rozv'yazok zadachi vioru optimalnyh parametriv metrologichnogo obslugovuvannya zasobiv vymiryvalnoi tehniky metodom Monte-Karlo, *zb.nauk. pr. DDTU*, 2012, No. 1(18), pp. 72–79.
5. Ignatkin V. U., Vitkin L. M., Litvinenko V. A., Bilyi O. I. Osoblivosti avtomatizatsii metrologichnogo obslugovuvannya ZVT promyslovyh pidpriemstv, *Metrologiya ta prylady*, 2010, No. 1, pp. 49–52.