

Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 621.317

М.В. Борисенко

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ ПЕРЕСУВНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

У статті розроблена методика визначення оптимальної періодичності проведення метрологічного обслуговування перспективної пересувної лабораторії вимірювальної техніки, яка заснована на теорії марківських випадкових процесів і теорії оптимізації. Отримана методика дозволяє розробити оптимальну структуру системи метрологічного забезпечення, яка призведе до більш ефективної експлуатації перспективної пересувної лабораторії вимірювальної техніки. Наводиться приклад застосування запропонованої методики.

Ключові слова: методика, метрологічне обслуговування, математична модель.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з основних форм підтримки перспективної пересувної лабораторії вимірювальної техніки (ПЛВТ) у справному стані є періодична перевірка її технічного стану, яка проводиться за методиками і правилами, викладеними в спеціальній нормативно-технічній документації [1 – 4]. Важливою складовою такої перевірки є метрологічне обслуговування (Моб), що представляє комплекс робіт з вимірювання та контролю параметрів (характеристик) складових елементів ПЛВТ (апаратури, пристроїв) та встановлення необхідності їх налаштування, регулювання або ремонту [5], яке необхідно проводити через оптимально обрані інтервали часу, тобто з потрібною періодичністю Моб.

Аналіз публікацій. В даний час існують три основні методи визначення періодичності Моб, засновані на: статистиці відмов; економічному критерії; довільному призначенні початкового періоду обслуговування з наступним коригуванням протягом усього терміну служби. Всі перераховані методи мають недоліки. Перший метод не рекомендується застосовувати для призначення періодичності Моб нових дослідних зразків складних технічних комплексів (СТК), для яких ще немає статистики відмов. Використання статистики відмов, отриманої при експлуатації аналогічних комплексів, не дозволяє визначити оптимальне значення періодичності Моб СТК. Аналогічний недолік має і третій метод (при призначенні початкового періоду Моб СТК). Помітимо, що для деяких СТК (наприклад, деяких зразків озброєння) у зв'язку з особливістю їх експлуатації економічний метод не є визначальним. Тому для знаходження оптимального значення пері-

одичності проведення Моб ПЛВТ пропонується використовувати математичні моделі експлуатації СТК, наприклад, розроблені із застосуванням теорії марківських випадкових процесів. Перевагою цього методу є те, що основні експлуатаційні параметри технічних комплексів (з урахуванням періодичності Моб) можна розрахувати теоретично перед початком його дослідної експлуатації.

Метою статті є розробка методики визначення оптимального значення періодичності проведення метрологічного обслуговування перспективної пересувної лабораторії вимірювальної техніки, заснованої на побудові та дослідженні його математичної моделі експлуатації із застосуванням теорії марківських випадкових процесів.

Основна частина

Принцип розробки марковської моделі експлуатації ПЛВТ добре вивчений та викладений у [6], тому сформулюємо тільки основні етапи розробки:

1) визначаються особливості експлуатації ПЛВТ та стану S_i , $i = \overline{1, N}$, де N – число станів, в яких вона може перебувати;

2) будується модель експлуатації ПЛВТ у вигляді графа, розраховуються інтенсивності λ_{ji} переходів лабораторії з i -го стану в j -й стан, $j = \overline{1, N}$, і складається система диференціальних рівнянь Колмогорова;

$$dP_i(t)/dt = \sum_{j=1}^N \lambda_{ji}(t)P_j(t), \quad (1)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність знаходження ПЛВТ в стані S_i моделі експлуатації.

Для "фінальних" ймовірностей P_i система (1) вироджується в систему алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{i=1}^N \lambda_{ij} P_i = 0, \quad (2)$$

при нормувальній умові $\sum_{i=1}^N P_i = 1$;

3) вирішується отримана система рівнянь і визначаються ймовірності P_i знаходження ПЛВТ в кожному з станів.

Після визначення всіх значень "фінальних" ймовірностей P_i можна розрахувати коефіцієнт готовності k_r ПЛВТ до застосування згідно з призначенням за формулою [6]:

$$k_r = P_1 / \sum_{i=1}^N P_i = P_1, \quad (3)$$

де P_1 – ймовірність стану, при якому ПЛВТ застосовується за призначенням (основний стан моделі експлуатації); P_i – ймовірність знаходження ПЛВТ в i -му стані із загального числа N його станів моделі експлуатації.

На підставі отриманої марківської моделі експлуатації можна розрахувати і комплексний економічний показник ефективності Моб ПЛВТ W_{mo} , який враховує витрати на знаходження лабораторії в тому чи іншому стані моделі експлуатації і при переході з одного стану в інший, а також економічний ефект (користь) від застосування її за призначенням [7]:

$$W_{mo} = \frac{BT/T_0}{BT/T_0 + A (\tilde{C}^+ + \tilde{C}^-)}, \quad (4)$$

$$\text{де } B = \left[\sum_{i=1}^N \tilde{C}_i P_i(\chi) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \tilde{C}_{ij} P_i(\chi) P_{ij}(\chi) + E_n \right];$$

$\tilde{C}_i, \tilde{C}_{ij}$ – матеріальні витрати коштів на експлуатацію відповідно при перебуванні в i -му стані, і при переході з i -го стану в j -й стан, наведені в частках вартості ПЛВТ; χ – вектор параметрів експлуатації (наприклад, періодичність та час проведення Моб, час відновлення); $P_i(\chi)$ – ймовірність перебування в i -му стані; $P_{ij}(\chi)$ – ймовірність переходів з i -го стану в j -й стан; \tilde{C}^+, \tilde{C}^- – величини, що визначають економічний ефект (користь) від застосування ПЛВТ за призначенням і запобігають матеріальним втратам від застосування несправної лабораторії, виражені в частках його вартості; A – чисельний коефіцієнт, що враховує виконання поставленого завдання чи завдань. $A = k_{оп} k_{vy} P_1$, де $k_{оп}, k_{vy}$ – чисельні коефіцієнти, що визначають відповідно рівень кваліфікації обслуговуючого ПЛВТ персоналу і рівень впливу зовнішніх умов на її застосування (змінюються в діапазоні від 0 до 1 і розраховуються на підставі визначених даних або методом експертних оцінок); $E_n = 0,12 - 0,15$ – нормативний коефі-

цієнт; T – термін знаходження в експлуатації; T_0 – термін служби до списання.

Отриманий вираз встановлює зв'язок запропонованого економічного показника ефективності W_{mo} ПЛВТ з параметрами процесу його експлуатації (вектор χ). В окремому випадку, коли коефіцієнт $A = 0$ (ПЛВТ не виконала поставлене завдання) показник ефективності $W_{mo} = 1$, тобто експлуатація об'єкту призведе до збитку, який складе вартість витрат на його придбання та експлуатацію.

Значення ймовірності $P_{ij}(\chi)$ пропонується розраховувати наступним чином:

$$P_{ij}(\chi) = \lambda_{ij} / \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad (5)$$

де λ_{ij} – інтенсивність переходу ПЛВТ з i -го стану в j -й стан експлуатації.

Використовуючи показник ефективності проведення метрологічного обслуговування W_{mo} , вирішимо завдання визначення оптимального значення періодичності T_n^o проведення Моб ПЛВТ. В залежності від пріоритетів, які покладені в основу експлуатації ПЛВТ (повинно забезпечуватися значення коефіцієнта готовності не менше певної величини або бути максимальною), сформулюємо завдання визначення оптимального значення періодичності проведення її Моб:

– завдання однопараметричної оптимізації: визначити оптимальне значення періодичності проведення Моб ПЛВТ T_n^o , що забезпечує мінімальну величину показника ефективності метрологічного обслуговування (4), при обмеженні коефіцієнта готовності k_r (наприклад, ймовірністю 0,95), тобто

$$T_n^o : \min W_{mo}(\chi^o, T_n) \text{ при } k_r \geq 0,95, \quad (6)$$

де χ^o – вектор параметрів експлуатації ПЛВТ, за винятком T_n ; при цьому частина параметрів цього вектора можуть бути такою, що неваріюється (заданою), інші параметри – такими, що варіюються, але обмежені заданими значеннями;

– завдання векторної оптимізації: знайти оптимальне значення періодичності проведення Моб ПЛВТ T_n^o , що забезпечує мінімальну величину показника ефективності метрологічного обслуговування і максимальне значення коефіцієнта готовності k_r , тобто

$$T_n^o : \min W_{mo}(\chi^o, T_n), \max k_r(\chi^o, T_n). \quad (7)$$

Оптимізаційну задачу (6) можна вирішити одним з методів дискретної оптимізації, наприклад, цілочисельного програмування [8]. Однак для визначення глобального екстремуму функції доцільно

використовувати метод найшвидшого спуску. Суть даного методу полягає в тому, що пошук глобального екстремуму оптимізаційної функції здійснюється з різних точок. Визначається напрямок найкоротшого локального спуску, тобто найбільшого локального зменшення цільової функції.

Оптимізаційну задачу (7) пропонується вирішувати методом послідовних поступок [9]. У цьому випадку дана задача перетвориться до виду: оптимальне значення періодичності Моб ПЛВТ виходить як результат рішення наступної послідовності задач оптимізації:

$$1) \text{ знайти } T_{\Pi}^0 : \min W_{\text{мо}}(\chi^0, T_{\Pi});$$

$$2) \text{ знайти } T_{\Pi}^0 : \max k_{\Gamma}(\chi^0, T_{\Pi}),$$

за умови $\min W_{\text{мо}}(\chi^0, T_{\Pi}) \leq W_{\text{мо}}(\chi^0, T_{\Pi}) - \Delta W_{\text{мо}}$,

де $\Delta W_{\text{мо}}$ – значення поступки для показника ефективності Моб ПЛВТ.

Таким чином, постановка і вирішення оптимізаційних задач (6) і (7) дозволить визначити оптимальне значення періодичності Моб ПЛВТ.

Методика визначення оптимального значення періодичності проведення метрологічного обслуговування ПЛВТ, вихідними даними для якої є вектор параметрів експлуатації χ , базується на наступних операціях.

1. Визначити можливі стани ПЛВТ під час експлуатації та побудувати граф станів. Вхідними даними для подальших розрахунків є інтенсивності переходів з одного стану в інший λ_{ij} і економічні параметри \tilde{C}^+ , \tilde{C}^- .

2. Для побудови марківської моделі експлуатації ПЛВТ, використовуючи граф станів, необхідно записати систему диференціальних рівнянь Колмогорова і обчислити ймовірності P_i знаходження ПЛВТ в i -му стані моделі експлуатації.

3. На основі відомостей з технічної та експлуатаційної документації задати параметри C_i, C_{ij} і визначити витрати на експлуатацію ПЛВТ.

4. Згідно з (3) розрахувати значення коефіцієнта готовності ПЛВТ до застосування за призначенням.

5. За формулою (4), попередньо розрахувавши ймовірності C_i, C_{ij} (5), обчислити значення показника ефективності проведення Моб ПЛВТ.

6. Вирішити оптимізаційну задачу (6) або (7) і визначити значення періодичності проведення Моб ПЛВТ.

Аналогічно розраховуються оптимальні значення для інших параметрів експлуатації ПЛВТ. Таким чином, постановка і вирішення оптимізаційних задач (6), (7) дозволить вибрати оптимальні параметри процесу експлуатації (вектор χ) ПЛВТ.

Застосування запропонованої методики розглянемо на наступному прикладі. Є модель експлуата-

ції складного технічного комплексу, яка представлена графом на рис. 1. В процесі експлуатації комплекс вартістю $C_1 = 50$ у.о. може знаходитися в одному з станів: в працездатному стані (нехай економічні витрати в ньому $C_1 = 10$ у.о.) – S_1 , в стані проведення Моб, наприклад, проводиться контроль напруги в точках A_i (витрати $C_2 = 1$ у.о.) – S_2 , в непрацездатному стані (витрати $C_3 = 0,5$ у.о.) – S_3 , в стані проведення відновлювальних робіт (ремонт, регулювання, середні витрати $C_4 = 3$ у.о.) – S_4 .

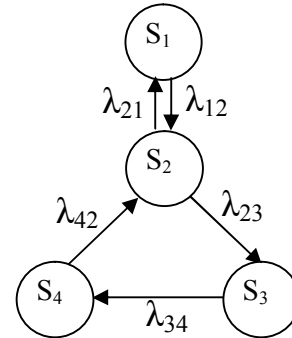


Рис. 1. Граф моделі експлуатації СТК

Інтенсивності переходів з одного стану в інший λ_{ij} , $i = \overline{1,4}$, $j = \overline{1,4}$, визначаються:

$$\lambda_{12} = T_{\Pi}^{-1}; \quad \lambda_{21} = t_{\Pi}^{-1}; \quad \lambda_{23} = T_{\text{от}}^{-1};$$

$$\lambda_{34} = T_{\text{ов}}^{-1}; \quad \lambda_{42} = t_{\text{в}}^{-1},$$

де T_{Π} , t_{Π} – періодичність і час проведення Моб СТК відповідно; $T_{\text{от}}$ – час напрацювання на відмову; $T_{\text{ов}}$ – час знаходження несправного СТК в черзі на відновлення; $t_{\text{в}}$ – час відновлення. Ймовірності перебування СТК в кожному з станів P_i попарно несумісні і складають повну групу подій. Припустимо, що переходи з одного стану в інший підпорядковані експоненціальним законом розподілу, тому випадковий процес, що протікає в моделі, можна вважати марківським. Складемо систему алгебраїчних рівнянь Колмогорова (2):

$$\begin{cases} \lambda_{12}P_1 = \lambda_{21}P_2; \\ \lambda_{23}P_2 = \lambda_{42}P_4; \\ \lambda_{34}P_3 = \lambda_{23}P_2; \\ \lambda_{42}P_4 = \lambda_{34}P_3, \end{cases} \quad (8)$$

умова нормування $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$.

Ймовірності переходів СТК з одного стану в інший, згідно (5), мають такі значення: $P_{12} = P_{34} = P_{42} = 1$; $P_{21} = 0,98$; $P_{23} = 0,02$.

Економічні витрати при цих переходах:

$$C_{12} = C_{42} = 0,1 \text{ у.о.}; \quad C_{34} = 0,01 \text{ у.о.};$$

$$C_{21} = C_{23} = 0,05 \text{ у.о.}$$

Економічний ефект від застосування СТК за призначенням становить $C^+ = 20$ у.е., $C^- = 30$ у.е. (при $A = 1$).

Параметри процесу експлуатації СТК $T_{от}$, t_v не варіювані, а оптимальні значення параметрів $T_{п}^0$, $t_{п}^0$, $T_{ов}^0$ визначимо, послідовно вирішивши оптимізаційну задачу вигляду (4) для параметрів $T_{п}$, $t_{п}$, $T_{ов}$.

Подальше проводяться розрахунки (рішення системи рівнянь (8), розрахунок виразу (4), рішення оптимізаційних задач).

Після рішення оптимізаційної задачі виду (6) для $T_{п}$ визначене оптимальне значення періодичності проведення Моб СТК $T_{п}^0 = 120$ год., після рішення оптимізаційної задачі (6) для $T_{ов}$ – оптимальний час знаходження в черзі на ремонт несправного СТК $T_{ов}^0 = 35$ год., після рішення оптимізаційної задачі (6) для $t_{п}$ – оптимальний час проведення Моб $t_{п}^0 = 4$ год. Результати обчислень показали, що первинні (призначені) параметри експлуатації комплексу були не оптимальними, а застосування оптимальних параметрів $T_{п}$, $t_{п}$, $T_{ов}$ дозволяє підвищити ефективність проведення Моб СТК на 5,6%, що в свою чергу, збільшує ефективність його експлуатації. При проведенні розрахунків був отриманий наступний комплексний економічний показник $W_{мо}$: для початкових даних – 0,2494, для оптимальних даних – 0,02353.

Висновки

Таким чином, отримана методика дозволяє визначати оптимальну періодичність проведення Моб перспективної ПЛВТ (або інші параметри експлуатації), яка залежить від особливостей проведення її

контролю та експлуатації. Методика може бути використана при виконанні та прийманні етапів дослідно-конструкторських робіт із створення (модернізації) ПЛВТ і дозволить розробляти оптимальну структуру системи метрологічного забезпечення, яка забезпечить більш ефективну експлуатацію пересувної лабораторії.

Список літератури

1. Савин С.К. Точность и работоспособность радиоэлектронных систем летательных аппаратов / С.К. Савин. – М.: Машиностроение, 1988. – 191 с.
2. Сычев Е.И. Основы метрологии военной техники / Е.И. Сычев, В.Н. Храменков, А.Д. Шкитин. – М.: Воениздат, 1993. – 400 с.
3. Крецул В.В. Метрологическое обеспечение эксплуатации сложных изделий / В.В. Крецул. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 200 с.
4. Оценка эффективности и параметрический синтез метрологического обслуживания радиоаппаратуры: Научно-методическое пособие / Отв. за выпуск Е.И. Сычев. – М.: МО СССР, 1984. – 385 с.
5. ДСТУ 2682-94. Метрологічне забезпечення. Основні положення. Чинний з 1.01.1995. – К.: Держстандарт України, 1994. – 16 с.
6. Демідов Б.О. Математична модель експлуатації перспективного зразка пересувної лабораторії виміральної техніки військового призначення / Б.О. Демідов, М.В. Борисенко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2013. – Вип. 6(113). – С. 66-70.
7. Чинков В.Н. Комплексная методика оптимизации контролируемых параметров сложных технических объектов / В.Н. Чинков, С.В. Герасимов // Український метрологічний журнал, 2003. – № 1. – С. 11-15.
8. Алексеев О.Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации / О.Г. Алексеев. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
9. Подиновский В.В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В.В. Подиновский, В.М. Гаврилов. – М.: Сов. радио, 1975. – 192 с.

Надійшла до редколегії 7.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.О. Демідов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

М.В. Борисенко

В статье рассмотрена методика определения оптимальной периодичности метрологического обслуживания перспективной передвижной лаборатории измерительной техники, которая основана на теории марковских случайных процессов и теории оптимизации. Полученная методика позволяет разработать оптимальную структуру метрологического обеспечения, которая приведет к более эффективной эксплуатации перспективной передвижной лаборатории измерительной техники. Приводится пример применения данной методики.

Ключевые слова: методика, метрологическое обслуживание, математическая модель.

METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL PERIODICITY METROLOGICAL MAINTENANCE ADVANCED MOBILE LABORATORY MEASUREMENT TECHNIQUE

M.V. Borisenko

The article describes the method of determining the optimal periodicity of metrological service a promising mobile laboratory measurement technique, which is based on the theory of Markov processes and optimization theory. The resulting method allows to develop an optimal structure of metrological provision, which will lead to more effective exploitation of promising mobile laboratory measuring equipment. An example of application of this technique.

Keywords: methods, metrological service matymatychna model.