

УДК 623.486

О.П. Коростельов

Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки ЗС України, Київ

ФОРМУВАННЯ ДОСТАТНІХ ЗА ОБСЯГОМ ВИБІРОК ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Запропонована методика, що ґрунтується на використанні експериментально-розрахункового підходу до формування достатніх за обсягом вибірок вихідних даних для розрахунку показників надійності озброєння і військової техніки.

Ключові слова: технічні системи, показники надійності, статистична обробка даних.

Вступ

Відомо, що для отримання результатів оцінок показників надійності зразків озброєння та військової техніки з достатньою достовірністю необхідно мати статистичні дані за результатами їх експлуатації, обсяг яких забезпечує досягнення заданої вірогідності означених оцінок. Для деяких зразків озброєння та військової техніки, наприклад для зенітних керованих ракет (ЗКР), формування таких вибірок в більшості випадків фактично не можливо [1]. У зв'язку з чим пропонується реальні статистичні дані експлуатації ЗКР доповнювати розрахунковими результатами дослідження спеціально створеної моделі їх експлуатації.

Результати досліджень

В цілому будемо мати на увазі, що модель експлуатації ЗКР призначена для адекватного відображення всіх елементів реального процесу експлуатації, починаючи від моменту виготовлення ракети та закінчуючи поточним (або будь-яким наперед заданим) проміжком часу. Процес експлуатації кожної ЗКР при цьому відображається у виді деякого безперервного в часі випадкового процесу $\{X(t), t \geq 0\}$ на дискретній множині можливого її стану $E = \{0, 1, 2, \dots, m\}$. Початковим станом процесу експлуатації ЗКР є її виготовлення. Іншим можливим її станом є утримання ЗКР у тих або інших режимах зберігання (у тому числі режимі тривалого зберігання, проміжної готовності, кінцевої готовності), транспортування ракети різними видами транспорту (залізничним, водним, авіаційним та автомобільним), відстріл ЗКР (в умовах бойових дій або полігонних навчань).

Можливість переходу процесу з одного стану в інший можливо визначити стохастичною матрицею переходів

$$\underline{W} = (w_{ij}), \quad (i, j) \in E \times E,$$

де w_{ij} – імовірність переходу процесу зі стану i до стану j .

При цьому

$$\sum_{j \in E} w_{ij} = 1, \quad i \in E, \quad w_{00} = 0.$$

Тривалість перебування в кожному зі станів є випадковою величиною та для кожної пари (i, j) задається відповідною функцією розподілу

$$F_{ij}(x) = \text{вер} \{ \xi_{ij} \leq x \},$$

де ξ_{ij} – тривалість перебування процесу у стані i при умові його переходу у стан j .

Таким чином, при відомому початковому стані еволюція процесу $\underline{X}(t)$ повністю визначається матрицею імовірності переходів \underline{W} та матрицею функцій розподілу випадкового часу перебування процесу в кожному зі станів $\underline{F} = F_{ij}(x)$, $(i, j) \in E \times E$. Відомо, що випадковий процес з такими властивостями є напівмарковським.

Введена таким чином напівмарковська модель дозволяє імітувати факт виготовлення ЗКР, транспортування її до місця експлуатації, постановку на будь-який з режимів утримання з подальшим переходом ракети з одного можливого стану в інший у відповідності до введених w_{ij} та $F_{ij}(x)$.

Окрім цього, здійснюється моделювання проведення періодичних технічних обслуговувань з контролем працездатності ЗКР, виявленням відмов компонентів ракети та їх заміною. При цьому на час кожної з перевірок здійснюється фіксація чисельних значень компонент вектора віку ракети.

У випадку оцінки такого показника надійності ЗКР, як її інтенсивність відмов, вводиться функція регресії $\lambda(\underline{B}, \underline{Z}(t))$, яка описує гіпотетичний закон зміни інтенсивності відмов ЗКР у залежності від умов експлуатації (\underline{B}) та її віку ($\underline{Z}(t)$), отримуємо модель відмов ЗКР. Еволюція значень компонент вектору віку $\underline{Z}(t)$ здійснюється у відповідності до тривалості перебування ЗКР в тому або іншому ста-

ні та задана матрицею (μ_{ik}) , $i \in E$, $k = 1, 2, \dots, n$, інтенсивності експлуатації, де μ_{ik} – середній темп росту k -ї компоненти вектора віку ракети у випадку перебування її в i -му стані. Таким чином, для міжрегламентного періоду (t_q, t_{q+1}) між q -й та $(q+1)$ -й перевірками встановлюється траєкторія $\underline{Z}(t)$, яку описує кінець вектора віку у факторному просторі компонент вектора віку, що дозволяє розрахувати імовірність безвідмовної роботи ЗКР протягом даного часового інтервалу та промодельовати факт відмови за допомогою відповідного випадкового механізму.

Нехай для деякого моменту часу t_q , що відповідає проведенню чергового регламентного контролю ЗКР, відомий набір значень компонент вектора її віку $\underline{Z}(t_q) = (z_1(t_q), z_2(t_q), \dots, z_n(t_q))$. Тоді може бути розраховане середнє значення цих компонентів на момент проведення наступного контролю ЗКР $t_{q+1} = t_q + T$. Покладемо, що в момент t_q ракета знаходилась у стані i_0 та в період часу T у відповідності до w_{ij} та $F_{ij}(x)$ послідовно пройшла через стани i_1, i_2, \dots, i_{s_q} , знаходячись у кожному з них у проміжку часових інтервалів тривалістю $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{s_q}$. Тоді

$$z_k(t_{q+1}) = z_k(t_q) + \sum_{l=1}^{s_q} \mu_{i_l k} \tau_l, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

При цьому імовірність того, що в ракеті, яка пройшла контроль та регулювання у момент часу

$$\begin{aligned} P(t_q, t_{q+1}) &= \exp \left\{ - \int_{t_q}^{t_{q+1}} \left(b_0 + \sum_{k=1}^n b_k z_k(t) + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} z_{k_1}(t) z_{k_2}(t) \right) dt \right\} = \\ &= \exp \left\{ - \left[b_0 (t_{q+1} - t_q) + \sum_{k=1}^n b_k c_k (t_{q+1} - t_q) + \sum_{k=1}^n b_k \frac{a_k}{2} (t_{q+1}^2 - t_q^2) + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} c_{k_1} c_{k_2} (t_{q+1} - t_q) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} \frac{a_{k_1} c_{k_1} - a_{k_2} c_{k_2}}{2} (t_{q+1}^2 - t_q^2) + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} \frac{a_{k_1} a_{k_2}}{3} (t_{q+1}^3 - t_q^3) \right] \right\} = \\ &= \exp \left\{ - \left[\left(b_0 + \sum_{k=1}^n b_k c_k + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} c_{k_1} c_{k_2} \right) (t_{q+1} - t_q) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^n b_k a_k + \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} (a_{k_1} c_{k_1} - a_{k_2} c_{k_2}) \right) (t_{q+1}^2 - t_q^2) + \frac{1}{3} \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} a_{k_1} a_{k_2} (t_{q+1}^3 - t_q^3) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Використовуючи як випадковий механізм датчик випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі $[0, 1]$, з імовірністю $P(t_q, t_{q+1})$ імітується безвідмовність ЗКР на момент t_{q+1} та з імовірністю

t_q , не виникає відмови на проміжку T , обчислюється за відомою формулою [2]

$$P(t_q, t_{q+1}) = \exp \left\{ - \int_{t_q}^{t_{q+1}} \lambda(\underline{B}, \underline{Z}(t)) dt \right\} = \exp \left\{ - \sum_{s=1}^{s_q} \int_{t_q + \sum_{i=1}^{s-1} \tau_i}^{t_q + \sum_{i=1}^s \tau_i} \lambda(\underline{B}, \underline{Z}(t)) dt \right\}, \quad \tau_{i_0} = 0. \quad (1)$$

Співвідношення (1) суттєво спрощується, якщо вважати, що траєкторія, яка описується кінцем вектора віку на інтервалі $[t_q, t_{q+1}]$, прямолінійна. В цьому випадку

$$\begin{aligned} z_k(t) &= z_k(t_q) + \frac{z_k(t_{q+1}) - z_k(t_q)}{t_{q+1} - t_q} (t - t_q) =, \quad (2) \\ &= a_k t + c_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \\ a_k &= \frac{z_k(t_{q+1}) - z_k(t_q)}{t_{q+1} - t_q} = \frac{1}{T} \sum_{l=1}^{s_q} \mu_{i_l k} \tau_l; \\ \text{де} \\ c_k &= z_k(t_q) - \frac{t_q}{T} \sum_{l=1}^{s_q} \mu_{i_l k} \tau_l. \end{aligned}$$

Тоді для гіпотетичного закону зміни інтенсивності відмов маємо [2]

$$\begin{aligned} \lambda(\underline{B}, \underline{Z}(t)) &= b_0 + \sum_{k=1}^n b_k z_k(t) + \\ &+ \sum_{k_1=1}^n \sum_{k_2 \geq k_1}^n b_{k_1} b_{k_2} z_{k_1}(t) z_{k_2}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

підставивши (3) в (1), з врахуванням (2) отримаємо

$1 - P(t_q, t_{q+1})$ – виникнення відмови в проміжок міжрегламентного інтервалу T . Для локалізації відмови, у випадку її виникнення, вводиться умовне розподілення ймовірностей виникнення відмов у

пристрогах та агрегатах ЗКР, яка відповідає будь-якій вибраній статистиці.

Таким чином, сукупність результатів перевірки заданої кількості ЗКР разом зі відомостями про умови їх експлуатації на час кожної з перевірок утворює статистичний матеріал, який використовується для обробки з метою виявлення закону зміни інтенсивності потоку відмов у залежності від умов експлуатації. Отриманий в результаті обробки імітованих моделлю ЗКР закон $\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))$ зміни інтенсивності відмов

може бути порівняний зараз з введеним в модель законом відмов. Ступінь збіжності цих законів у просторі можливих значень компонент вектора віку характеризує якість досліджуваної методики формування даних для оцінки та прогнозування надійності ЗКР. У якості міри розпізнавання можливо використати [1]

відстань в евклідовій метриці

$$W = \left\{ \int_0^{T_{\text{пр}}} \left[\tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) - \tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) \right]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

міра Колмогорова

$$K = \max \left| \tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) - \tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) \right|, \quad (6)$$

міра Бхаттачарія

$$B = -\ln \int_0^{T_{\text{пр}}} \left[\tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) - \tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) \right]^{1/2} dt, \quad (7)$$

$$\text{де } \tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) = \frac{\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))}{\max \{ \lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) \}};$$

$$\tilde{\lambda}(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) = \frac{\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))}{\max \{ \lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t)) \}}.$$

Алеж слід помітити, що практичні розрахунки у відповідності з співвідношеннями (5) – (7) трудомісткі. До того ж чисельні значення наведених критеріїв відповідності законів недостатньо наочні.

Розглянемо інший підхід до оцінки ефективності методики відновлення закону зміни інтенсивності відмов [2]. Виберемо деяку сукупність точок факторного простору компоненти вектора віку $\{z_1, z_2, \dots, z_r\}$. Для кожної з цих точок розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи протягом часового інтервалу заданої тривалості з використанням зако-

нів $\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))$ та $\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))$ зміни інтенсивності відмов. Для порівняння двох отриманих наборів ймовірностей $\{P_{z_1}, P_{z_2}, \dots, P_{z_r}\}$ та $\{\hat{P}_{z_1}, \hat{P}_{z_2}, \dots, \hat{P}_{z_r}\}$ можливо використовувати такі прості та наочні показники як середнє відхилення δ_1 , середньоквадратичне відхилення δ_2 , максимальне відхилення δ_3

$$\delta_1 = \frac{1}{r} \sum_{s=1}^r |p_{z_s} - \hat{p}_{z_s}|; \quad \delta_2 = \left[\frac{1}{r} \sum_{s=1}^r (p_{z_s} - \hat{p}_{z_s})^2 \right]^{1/2};$$

$$\delta_3 = \max \{ |p_{z_s} - \hat{p}_{z_s}| \}.$$

Висновки

Таким чином, запропонована модель експлуатації ЗКР дозволяє здійснити оцінку ефективності розробленої методики обробки накопичуваного в ході збору донесень статистичного матеріалу у відповідності з такою схемою:

вибір гіпотетичної еталонної моделі надійності ЗКР $\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))$;

генерація за допомогою моделі статистичної інформації про умови та результати проведення перевірок ЗКР;

обробка накопиченого статистичного матеріалу з метою відновлення моделі надійності ЗКР $\lambda(\hat{\underline{B}}, \underline{Z}(t))$;

оцінка ефективності методики, яка використовується.

Список літератури

1. Ковтуненко А.П. Основы анализа сложных технических систем. Теория и приложения: моногр. / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев. – К.: Изд-во НАУ, 2009. – 487 с.
2. Ковтуненко А.П. Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем: монография / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев, Л.Г. Раскин. – К.: НАУ, 2005. – 183 с.

Надійшла до редколегії 12.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Певцов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ФОРМИРОВАНИЕ ДОСТАТОЧНЫХ ПО ОБЪЕМУ ВЫБОРОК ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

О.П. Коростелев

Предложена методика, которая основывается на использовании экспериментально расчетного подхода к формированию достаточных по объему выборок выходных данных для расчета показателей надежности вооружения и военной техники.

Ключевые слова: технические системы, показатели надежности, статистическая обработка данных.

FORMING OF SUFFICIENT ON VOLUME SELECTIONS OF THE OUTPUT RELIABILITY OF ARMAMENT AND MILITARY TECHNIQUE INDEXES GIVEN FOR CALCULATION

O.P. Korostelev

A method which is based on the use experimentally of the calculation going near forming of sufficient on volume selections of the output reliability of armament and military technique indexes given for a calculation is offered.

Keywords: technical systems, reliability indexes, statistical processing of data.