УДК 629.7

Д.В. Дяченко[1], А.В. Кошель[1], А.В. Поляков[2]

[1]Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба
[2]Об'єднаний науково-дослідний інститут ЗС України, Харків

МЕТОД РОЗНЕСЕНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ ЗАСОБІВ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Розроблений метод рознесеного прогнозування для нерезервованих засобів складних технічних систем. Показано, що застосування пропонованого методу підвищує мінімум імовірності безвідмовної роботи на міжпрофілактичному часовому інтервалі.

складна військово-технічна система

Вступ

Постановка проблеми і аналіз літератури. Для успішного функціонування складних військово-технічних систем (СВТС) необхідні методи організації прогнозування й оцінки якості з урахуванням їх структурних схем надійності.

На практиці структурні схеми надійності (ССН) СВТС можна представити у вигляді паралельно-послідовного з'єднання елементів. Під елементом розуміється функціонально закінчений вузол (як правило, технічний засіб), на якому можуть реалізовуватися процеси прогнозування й оцінки якості функціонування СВТС без впливу на сусідні вузли (технічні засоби) [1 – 4].

Задачу пошуку оптимальних інтервалів рознесення можна декомпозувати на дві часткові: для нерезервованих елементів (технічних засобів), що складають шлях у структурні схеми надійності, і для резервованих ланок структурних схем надійності (паралельне з'єднання елементів (технічних засобів) у даній ланці), тому розроблені два методи для кожного з цих випадків.

Метою даної статті є розробка методу рознесеного прогнозування для нерезервованих засобів СВТС.

Основна частина

Пропонований метод полягає в наступному:

1. Проводиться пошук оптимальних інтервалів рознесення прогнозування й оцінки якості системи.

Враховуючи, що як основне обмеження при формуванні стратегій виступає мінімальне значення функції імовірності безвідмовної роботи (ІБР) на міжпрофілактичному інтервалі, розв’язання кожної з наведених часткових задач має сенс для прийнятої базової стратегії періодичного прогнозування й оцінки якості при дотриманні умови:

$$\forall\tau: \min_{t\in\left[0,\overline{T_{\text{то}}}\right]} P_c\left(t,\tau\right) \ge P_{c1}\left(\overline{T_{\text{то}}}\right), \qquad (1)$$

де $P_{c1}\left(\overline{T_{\text{то}}}\right)$ – мінімальне значення функції імовірності безвідмовної роботи за міжпрофілактичний інтервал при одночасному обслуговуванні всіх елементів структурних схем надійності (існуюча стратегія);

$\forall\tau: \min\limits_{t\in\left[0,\overline{T_{\text{то}}}\right]} P_c\left(t,\tau\right)$ – мінімальне значення функції імовірності безвідмовної роботи на міжпрофілактичному інтервалі при рознесеному обслуговуванні елементів (технічних засобів) структурних схем надійності;

$\tau=\left\{\tau_j, j=\overline{1,n-1}\right\}$ – множина інтервалів рознесення процесу прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів) структурних схем надійності;

n – кількість елементів у структурній схемі надійності системи;

$\overline{T_{\text{то}}}$ – середня періодичність прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів).

2. Знаходяться такі значення $\tau^*=\left\{\tau_j^*, j=\overline{1,n-1}\right\}$ інтервалів рознесення моментів початку прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів) структурних схем надійності, які задовольняють умові

$$\min_{t\in[0,\overline{T_{\text{TO}}}]} P_c(t,\tau^*) = \max_{\tau} \min_{t\in[0,\overline{T_{\text{TO}}}]} P_c(t,\tau) \qquad (2)$$

при таких припущеннях:

1) структурні схеми надійності є послідовними з'єднаннями n різнонадійних елементів (технічних засобів) СВТС, розподіл напрацювання на відмову яких описується експоненціальним законом;

2) середня тривалість прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів) набагато менше за їх середнє напрацювання на відмову і періодичності робіт, тому її можна прийняти рівною нулю;

3) при проведенні прогнозування й оцінки якості функціонування відбувається повне відновлення

працездатності елементів (технічних засобів) СВТС.

Дані припущення достатньо точно відповідають практиці експлуатації технічних засобів СВТС.

3. Перевіряється твердження, що при будь-якому зсуві початку прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів) структурних схем надійності відносно нульового при стаціонарному процесі обслуговування для заданої періодичності дотримуватиметься умова (1).

Дійсно, при одночасному обслуговуванні всіх елементів (технічних засобів) структурних схем надійності СВТС, враховуючи властивість монотонності функції імовірності безвідмовності роботи, свого мінімуму імовірність безвідмовності роботи досягає при $t = \overline{T_{то}}$, тобто:

$$\min_{t\in[0,\overline{T_{то}}]} P_{c1}(t) = P_{c1}\left(\overline{T_{то}}\right) = \prod_{j=1}^{n} p_j\left(\overline{T_{то}}\right), \qquad (3)$$

де $p_j\left(\overline{T_{то}}\right)$ – мінімальне значення імовірності безвідмовності роботи j-го елемента (технічного засобу).

Розглянемо будь-яку іншу модифікацію періодичного прогнозування й оцінки якості, для якої реалізується рознесена оцінка якості елементів (технічних засобів) на інтервалі $\left[0,\overline{T_{то}}\right]$. При цьому на інтервалі $\left[0,\overline{T_{то}}\right]$ функція імовірності безвідмовності роботи матиме m локальних мінімумів.

Множина значень m обмежена зверху і знизу, тобто $1 \le m < n$, де n – кількість елементів (технічних засобів) у структурних схемах надійності.

Елементи (технічні засоби), що обслуговуються одночасно, у структурних схемах надійності об'єднуються в один елемент, для якого інтенсивність відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів (технічних засобів) СВТС, що входять до нього.

При цьому значення k-го ($k = \overline{1,m}$) локального мінімуму функції імовірності безвідмовності роботи для СВТС у цілому на інтервалі $\left[0,\overline{T_{то}}\right]$ може бути знайдено з такого співвідношення:

$$P_{\min_k} = \prod_{j=1}^{k} P_j\left(\tau_k - \tau_{j-1}\right) \prod_{j=k+1}^{m} P_j\left(\overline{T_{то}} - \tau_{j-1} + \tau_k\right). \qquad (4)$$

Оскільки функція імовірності безвідмовності роботи монотонно спадна, то для будь-якого $P_{\min_k}$ справедлива нерівність

$$P_{\min_k} > \min P_{ci}(t), \qquad (5)$$

де $\min P_{ci}(t)$ визначається виразом (2), тобто дотримується умова (1).

4. Перевіряється виконання умови при будь-якому зсуві початку прогнозу відносно нульового моменту часу при стаціонарному процесі і необхідна й достатня умова забезпечення $\max\limits_{\tau} \min\limits_{t\in[0,\overline{T}_{TO}]} P_c(t,\tau)$. Для цього використовуються рівності:

$$P_c(\tau_1,\tau) = P_c(\tau_2,\tau) = \ldots = P_c(\tau_n,\tau) = a, \qquad (6)$$

де $a = \min\limits_{t\in[0,\overline{T}_{TO}]} P_c(t,\tau)$.

З (6) випливає, що (для прийнятих припущень) оптимальні інтервали рознесення моментів початку прогнозування й оцінки якості функціонування СВТС визначаються при розв'язанні системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \tau_1 \cdot \sum\limits_{\substack{i=1\\ i\ne 2}}^{n} \lambda_i + \overline{T}_{TO} \cdot \sum\limits_{i=2}^{n} \lambda_i - \sum\limits_{i=2}^{n-1} \lambda_{i+1} \cdot \tau_i = -\ln a; \\ \tau_2 \cdot \sum\limits_{\substack{i=1\\ i\ne 3}}^{n} \lambda_i + \overline{T}_{TO} \cdot \sum\limits_{i=3}^{n} \lambda_i - \sum\limits_{\substack{i=1\\ i\ne 2}}^{n-1} \lambda_{i+1} \cdot \tau_i = -\ln a; \\ ------------------------ \\ \tau_j \cdot \sum\limits_{\substack{i=1\\ i\ne j+1}}^{n} \lambda_i + \overline{T}_{TO} \cdot \sum\limits_{i=j+1}^{n} \lambda_i - \sum\limits_{\substack{i=1\\ i\ne j}}^{n-1} \lambda_{i+1} \cdot \tau_i = -\ln a; \\ ------------------------ \\ \overline{T}_{TO} \cdot \wedge - \sum\limits_{i=1}^{n-1} \lambda_{i+1} \cdot \tau_i = -\ln a, \end{cases} \qquad (7)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ – інтенсивності відмов елементів (технічних засобів);

$\wedge = \sum\limits_{i=1}^{n} \lambda_i$ – узагальнений параметр відмов СВТС у цілому.

При цьому оптимальні тривалості інтервалів рознесення моментів початку прогнозування й оцінки якості функціонування СВТС елементів (технічних засобів) визначаються виразом:

$$\tau_j^* = \overline{T}_{TO} \cdot \frac{\sum\limits_{i=1}^{j} \lambda_i}{\wedge}, \; j == \overline{1, n-1}. \qquad (8)$$

5. Визначається середнє напрацювання на відмову. Для цього перевіряється характер зміни середнього напрацювання на відмову (СНВ) СВТС при використанні рознесеного прогнозування й оцінки якості функціонування системи. Вираз для обчислення середнього напрацювання на відмову засобу з послідовним з'єднанням елементів при використанні поелементної оцінки має вигляд:

$$\begin{aligned} \overline{T}_P = & \int_0^{\tau_1} P_1(t) \cdot P_2(t + \overline{T}_{TO} - \tau_1) \times \ldots \times P_n(t + \overline{T}_{TO} - \tau_{n-1}) dt + \\ & + \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_1(t) \cdot P_2(t - \tau_1) \cdot P_3(t + \overline{T}_{TO} - \tau_2) \times \ldots \times P_n(t + \overline{T}_{TO} - \tau_{n-1}) dt + \\ & + ---------------------------------+ \\ & + \int_{\tau_{n-1}}^{\overline{T}_{TO}} P_1(t) \cdot P_2(t - \tau_1) \times \ldots \times P_n(t - \tau_{n-1}) dt, \end{aligned} \qquad (9)$$

де $0 \le \tau_1 \le \tau_2 \le \ldots \le \tau_{n-1} \le \overline{T}_{TO}$ – часові зсуви моментів початку прогнозування й оцінки якості функціонування елементів (технічних засобів) СВТС відносно початкового відліку часу;

$P_j(t)$ – імовірність безвідмовної роботи j-го елемента (технічного засобу).

Для експоненціального закону розподілу напрацювання на відмову вираз (9) перетвориться до вигляду:

$$\overline{T}_P = \frac{1}{\wedge} \cdot \sum_{j=1}^{n} a_j \times$$
$$\times \exp\left\{-\left[\tau_{j-1} \cdot \wedge + \overline{T}_{TO} \cdot \left(\wedge - \sum_{i=1}^{j} \lambda_i\right) - \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i \cdot \lambda_{i+1}\right]\right\}, \quad (10)$$

де $a_j = 1 - \exp\left(-\lambda_j \cdot \overline{T}_{TO}\right)$.

Дослідження функції (10) на екстремум показало, що вона має мінімум у стаціонарній точці $\tau^{**} = \{\tau_j^{**}, j = \overline{1, n-1}\}$:

$$\tau_j^{**} = \frac{1}{\wedge} \cdot \ln\left(\frac{a_{j+1} \cdot \lambda_1}{a_1 \cdot \lambda_{j+1}}\right) \cdot \exp[\overline{T}_{TO} \cdot \sum_{i=1}^{j} \lambda_{i+1}], j = \overline{1, n-1}, \quad (11)$$

а мінімальне значення $\overline{T}_P^{**}$ визначається виразом:

$$T_P^{**} = \frac{1}{\wedge} \cdot a_1 \cdot \exp[-\overline{T}_{TO} \cdot (\wedge - \lambda_1)] + \sum_{j=2}^{n} \frac{a_j^2 \cdot \lambda_1}{a_1 \cdot \lambda_j} \times$$
$$\times \exp\left[-\overline{T}_{TO} \cdot \sum_{i=2}^{j} \lambda_i])\right] \times \quad (12)$$
$$\times \exp\left\{-\frac{1}{\wedge} \cdot \sum_{j=2}^{n} \lambda_j \cdot \ln\left[\frac{a_j \cdot \lambda_1}{a_1 \cdot \lambda_{j1}} \cdot \exp\left(-\overline{T}_{TO} \cdot \sum_{i=2}^{j} \lambda_i\right)\right]\right\}.$$

Аналіз виразу (10) показує, що середнє напрацювання на відмову СВТС на міжпрофілактичному інтервалі при застосуванні рознесеного прогнозування й оцінки якості функціонування системи тим менше, чим більший цей інтервал, у межі $\underline{\lim}_{T_{TO} \to \infty} \overline{T_P} = 0$.

Для існуючої модифікації періодичного прогнозування й оцінки $\underline{\lim}_{T_{TO} \to \infty} \overline{T_P} = \frac{1}{\wedge}$.

Слід зазначити, що єдиність розв’язання системи лінійних рівнянь (7) свідчить про монотонне зростання функції (10) відносно її значення в стаціонарній точці: $\tau^{**} = \left\{\tau_j^{**}, j = \overline{1, n-1}\right\}$.

6. Проводиться пошук $\max_{\tau} \overline{T_P}$ за умови: $\tau_j \to 0, j = \overline{1, n-1}$.

7. Знаходиться відношення значення k-го локального максимуму функції імовірності безвідмовної роботи P_{max_k} до значення її k-го локального мінімуму при рознесеному прогнозуванні.

Розглянемо важливу властивість функції імовірності безвідмовної роботи при застосуванні рознесеного прогнозування й оцінки якості функціонування СВТС для нерезервованих систем, що мають різнонадійні елементи (технічні засоби) з експоненціальним законом розподілу напрацювання на відмову. Відношення значення k-го локального максимуму функції імовірності безвідмовної роботи P_{max_k} до значення її k-го локального мінімуму при рознесеному прогнозуванні не залежить від кількості елементів у структурних схемах надійності СВТС. Запишемо вираз

$$P_{max_k} = \prod_{j=1}^{k} P_j\left(\tau_k - \tau_{j-1}\right) \prod_{j=k+2}^{m} P_j\left(\overline{T_{TO}} - \tau_{j+1} + \tau_k\right).$$

У цьому випадку $\dfrac{P_{max_k}}{P_{min_k}} = \exp\left(\lambda_k \overline{T_{TO}}\right)$.

8. Перевірка відношення парних граничних значень імовірності безвідмовної роботи на міжпрофілактичному інтервалі. Це відношення визначається тільки значенням періодичності прогнозування й оцінки якості функціонування систем та інтенсивностями відмов елементів, не залежить від кількості елементів (технічних засобів) у структурній схемі надійності СВТС.

Висновки

Таким чином, застосування розробленого методу рознесеного прогнозування для нерезервованих СВТС підвищує мінімум імовірності безвідмовної роботи на міжпрофілактичному часовому інтервалі. Дану обставину пропонується враховувати при плануванні прогнозування й оцінки якості функціонування СВТС.

Список літератури

1. *Бранец В.Т., Комарова Л.И. О проблемах автоматизации управления полетом космических кораблей и станций // Изв. АН СССР. Технокибернетика. – 1992. – № 2. – С. 37-41.*

2. *Васильев В.А., Левкин М.И., Павленко А.И. Реконфигурация интегрированной системы управления с помощью экспертной системы // Вопросы кибернетики. Управляющие вычислительные системы движущихся объектов. – М., 1988. – С. 51-61.*

3. *Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.*

4. *Ловцов Д.А. Основы лингвистического и информационного обеспечения АСУ. в 2-х ч. – Ч .1. – М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1989. – 240 с.; – Ч. 2. – М., 1990. – 260 с.*

Надійшла до редколегії 12.08.2006

Рецензент: д-р техн. наук, ст. наук. сп. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.