

ФОРМАЛІЗОВАНЕ ПОДАННЯ ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

УДК 621.396.6.019.3

О. М. Шинкарук

Одним із існуючих напрямів забезпечення потрібного рівня надійності радіотехнічних систем (РТС) різноманітного призначення залишається використання резервів, тобто додаткових засобів та (або) можливостей, що є надлишковими відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій [1]. Так, в процесі конструювання, коли вичерпані технологічні можливості покращення характеристик надійності РТС, використовується структурне резервування. У процесі експлуатації також вирішуються завдання забезпечення потрібного рівня надійності шляхом застосування оптимальних (раціональних) режимів функціонування, ефективних концепцій технічного обслуговування та ремонту [2; 3]. Проведений аналіз науково-методичної бази у даній предметній сфері свідчить про те, що до теперішнього часу виконана значна кількість робіт вітчизняних і зарубіжних авторів з оптимізації режимів технічного обслуговування складних технічних систем [4; 5; 6]. Сьогодні існує значна кількість літератури, яка саме присвячена вивченню питань організації технічного обслуговування систем без урахування їх структури, систем з послідовним з'єднанням елементів і систем із структурним резервом. Разом із тим існують роботи, присвячені обліку резерву часу проведенні технічного обслуговування [7].

Аналіз показав, що одним з перспективних шляхів підвищення ефективності технічного обслуговування є використання (і облік в моделях) резервів часу не тільки під час відновлення працездатності, але і під час проведення технічного обслуговування. Незважаючи на наявність окремих теоретичних робіт, виконаних в цьому напрямку, ціла низка питань ще не досліджена. Так, відомі моделі технічного обслуговування не повною мірою враховують все різноманіття експлуатаційних чинників, режимів використання і характер дії об'єктів, види надмірностей, що використовуються, і методів резервування, характеристики контролю технічного стану й інше. Недостатньо досліджені питання порівняльної оцінки ефективності різних видів технічного обслуговування і взаємопов'язаного

впливу вказаних раніше чинників, зокрема почасової і структурної надмірності, на показники надійності. Це тим більш важливо, бо такий комплексний підхід до дослідження надійності систем з надмірністю призводить до нових якісних і кількісних результатів, що розкривають важливі властивості й особливості таких систем.

За ознакою наявності надмірностей найбільшу зацікавленість являють собою системи, в яких передбачено почасове резервування, та системи, в яких спільно використовується почасове і структурне резервування. Кожен вид надмірності має певні переваги і недоліки, які необхідно враховувати під час вибору того або іншого виду резервування. При цьому кожен вид резерву окремо висуває певні умови до організації і проведення заходів технічного обслуговування та ремонту (ТО і Р). Наприклад, наявність в об'єктах структурного резерву приводить до одночасного підвищення як надійності самого об'єкта за рахунок резервування, так і до збільшення простоїв на проведення ТО за рахунок збільшення об'єму систем і механізмів об'єктів експлуатації, тоді як резерв часу дозволяє зменшити ці простої. Це можливо за рахунок проведення операцій ТО за допустимий час $\tau_{ДП}$, що є в загальному випадку випадковою величиною (ВВ) з функцією розподілу (ФР) $D_i(t) = P\{\tau_{ДП} < t\}$, або за рахунок екстреного приведення об'єкта в готовність до використання за призначенням з режиму ТО за час, що не перевищує встановленого в нормативно-технічній документації (НТД).

Таким чином, завдання полягає у визначенні залежності показників якості функціонування об'єкта від функції $G(t)$, що визначає періодичність проведення планових попереджувальних профілактик, і знаходженні функції $G^*(t)$, при якій цей показник приймає екстремальне значення, тобто визначенні оптимальної періодичності проведення попереджувальних профілактичних заходів.

Розглядається деякий об'єкт, що має певні характеристики безвідмовності і ремонтпридатності. При цьому безвідмовність характеризується функці-

єю розподілу (ФР) $F(t) = P\{\xi \leq t\}$, де ξ – напрацювання об'єкта між відмовами. Ремонтпридатність об'єкта визначається тривалістю проведення передбачених відновних робіт, профілактик і позапланових ремонтів. Необхідність у проведенні відновлення може виникнути в деякий випадковий, заздалегідь невідомий момент часу (наприклад, під час відмови об'єкта), або в заздалегідь призначений календарний момент часу (наприклад, під час проведення планових попереджувальних профілактик). Слід відмітити, що заздалегідь призначений календарний момент часу може бути випадковим в тому сенсі, що проведення планової відновної роботи призначається через час T , що визначається як реалізація деякої випадкової величини з функцією розподілу $G(t)$. При цьому також вважається, що в загальному випадку відмова об'єкта виявляється через випадковий час ξ з деякою ФР $L(t)$. Це дає можливість розглядати під час вирішення завдань два крайні випадки, а саме: вияв відмови відбувається миттєво або самостійно відмова не виявляється. Отже, рішення про проведення відновних робіт у низці випадків ухвалюється за спостережуваним станом об'єкта, який може відрізнятися від дійсного стану.

У відомих науково-методичних підходах до оптимізації системи технічного обслуговування та ремонту не враховано багато чинників реального функціонування технічних об'єктів, що впливають на ефективність цих заходів і вибір оптимальної стратегії їх проведення. Зокрема, у них не врахована можливість використання почасової надмірності для забезпечення нормального функціонування об'єктів в умовах дії дестабілізуючих чинників. Об'єкти з почасовою надмірністю відмови складових систем, при дотриманні деяких умов, можуть не призводити до зриву функціонування.

При виконанні певних вимог до тривалості відновлення працездатності наслідки відмов апаратури після їх усунення можуть неістотно відобразитися на якості і своєчасності завдань, що виконує об'єкт. Отже, нормальне функціонування таких об'єктів може бути забезпечене не тільки унаслідок підвищення безвідмовності складових систем і механізмів або збільшення об'єму структурного резерву, але і шляхом створення резерву часу і його використання для відновлення технічних характеристик об'єкта безпосередньо в процесі його експлуатації. При цьому об'єкти з почасовим резервуванням зручно представляти у вигляді деякої умовної системи (схеми) "об'єкт – час" (ОЧ), яка складається з двох елементів – будь-якого резервованого об'єкта і резерву часу. Ця схема якісно аналогічна відомій схемі структурного ненавантаженого одноразового резервування (дублювання), в котрій услід за відмовою об'єкта "включається" і діє резерв часу. Відмова системи ОЧ виникає у момент витрачання резерву часу, якщо до цього моменту працездатність елемента не буде відновлена або якщо об'єкт не буде приведений у готовність до використання з режиму ТО. У результаті цього спостерігається ефект розрідження відмов, який виявляється тим сильніше, чим більше виділяється резервного часу і чим ефективніше він використовується. Для кількісної оцінки цього ефекту можуть бути

використані формули, що одержані в теорії почасового резервування [4; 5; 7]. Так, ймовірність безвідмовного функціонування $P(t, t_D)$ системи з поповнюваним резервом часу визначається:

а) якщо резерв часу – ВВ τ_D з довільною ФР $D(t) = P\{\tau_D \leq t\}$ і математичним сподіванням (МС) $\bar{\tau}_D$, то

$$P(t, t_D) = \exp\left(-\frac{gt}{t_H}\right), t_H \gg \tau_D, \quad (1)$$

де t_H – математичне сподівання напрацювання об'єкта між відмовами (t_H); g – ймовірність того, що відмова об'єкта призведе до відмови системи;

б) якщо резерв часу – не випадкова постійна величина $\tau_D = t_D = \text{const}$, то

$$P(t, t_D) = \begin{cases} 1, & t \leq t_D, \\ \exp\left[-\frac{g(t-t_D)}{t_H}\right], & t \geq t_D. \end{cases} \quad (2)$$

Ймовірність того, що відмова об'єкта призведе до відмови системи, може бути вираженою

$$g = P\{t_B \leq t_D\} = \int_0^{\infty} [1 - F_B(t)] dD(t). \quad (3)$$

Наведені вище вирази кількісної оцінки ефекту розрідження вхідного потоку відмов відповідають загальному випадку, а в частковому випадку при $\tau_D = t_D = \text{const}$

$$g = P\{t_B \leq t_D\} = 1 - F_B(t_D), \quad (4)$$

де $F_B(t)$ – ФР часу t_B відновлення працездатності об'єкта з МС t_B .

Середнє напрацювання системи на відмову $\bar{T}_0(\tau_D)$ визначається згідно з формулою

$$\bar{T}_0(\tau_D) = \frac{1}{g} [\bar{t}_H + M \min(t_B, t_D)], \quad (5)$$

де $M \min(t_B, t_D) = \int_0^{\infty} [1 - F_B(t)][1 - D(t)] dt$ – якщо резерв часу – ВВ τ_D з ФР $D(t)$;

$$M \min(t_B, t_D) = \int_0^{t_D} [1 - F_B(t)] dt, \quad \text{якщо } \tau_D = t_D = \text{const}. \quad (7)$$

Середній час відновлення працездатності системи $\bar{T}_0(\tau_D)$ рівний математичному сподіванню ВВ – перевищення часу t_B над резервом часу t_D за умови, що $t_B > t_D$, і виражається формулою

$$\bar{T}_B(t_D) = \frac{1}{g} [\bar{t}_B - M \min(t_B, t_D)], \quad (8)$$

де g і $M \min(t_B, \tau_D)$ визначаються за формулами (4) і (7) відповідно.

У загальному випадку, коли резерв часу ВВ τ_D з ФР $D(t)$, для $\bar{T}_0(\tau_D)$ справедливий вираз

$$\bar{T}_B(\tau_D) = \frac{1}{g} [\bar{t}_B - M \min(t_B, \tau_D)], \quad (9)$$

де g і $M \min(t_B, \tau_D)$ визначаються за формулами (3) і (6) відповідно.

Використовуючи вирази (5) і (9) і співвідношення

$$K_r(\tau_D) = \frac{\bar{T}_o(\tau_D)}{\bar{T}_o(\tau_D) + \bar{T}_B(\tau_D)}, \quad (10)$$

неважко отримати формулу для коефіцієнта готовності системи ОЧ:

$$K_r(\tau_D) = \frac{\bar{t}_H + M \min(t_B, \tau_D)}{t_H + t_B} = k_r + (1 - k_r)(1 - g), \quad (11)$$

при цьому $1 - g = P\{t_B \leq \tau_D\} = M \min(t_B, \tau_D) / \bar{t}_B$, (12)

де $k_r = \frac{\bar{t}_H}{(\bar{t}_H + \bar{t}_B)}$ – коефіцієнт готовності об'єкта.

Коефіцієнт технічного використання $K_{TB}(\tau_{DI})$ технічних систем, в яких передбачено обслуговування за технічним станом, допустимим (резервним) часом τ_{DI} (або t_{DI}) є обмеження, що накладаються на тривалість проведення контролю технічного стану t_k і тривалість проведення ТО t_{mo} . В цьому випадку середня тривалість $\bar{T}_K(\tau_{DI})$, проведення контролю технічного стану і середня тривалість $\bar{T}_{mo}(\tau_{DI})$ проведення ТО виражаються формулами:

$$\bar{T}_K(\tau_{DI}) = \frac{1}{g_1} [\bar{t}_k - M \min(t_k, \tau_{DI})], \quad (13)$$

$$\bar{T}_{mo}(\tau_{DI}) = \frac{1}{g_1} [\bar{t}_{mo} - M \min(t_{mo}, \tau_{DI})], \quad (14)$$

де t_k і t_{mo} – випадкові величини, що мають довільні ФР $F_K(t)$ і $\Phi(t)$ з кінцевими МОЧ \bar{t}_k і \bar{t}_{mo} відповідно.

В окремому випадку, коли $\tau_{DI} = t_{DI} = const$ у формули (13) і (14) необхідно замість τ_{DI} підставляти t_{DI} . Для таких систем коефіцієнт технічного використання виражається формулою

$$K_{TB}(\tau_D) = \frac{\bar{T}_o(\tau_D)}{\bar{T}_o(\tau_D) + \bar{T}_K(\tau_{DI}) + \bar{T}_{mo}(\tau_{DI}) + \bar{T}_B(\tau_D)}. \quad (15)$$

Наведені вище формули для одиничних і комплексних показників дозволяють кількісно оцінити ефект підвищення (забезпечення) надійності за рахунок використання резервів часу. Цей ефект може бути оцінений за допомогою співвідношень:

$$V_Q = \frac{Q(t)}{Q(t, t_D)} = \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \exp[-\lambda(t - t_D)(1 - F_B(t_D))]}, \quad (16)$$

$$V_{\bar{T}_o} = \frac{\bar{T}_o(t_D)}{\bar{t}_H} = \ell^{\mu t_D} + \frac{\lambda}{\mu} (\ell^{\mu t_D} - 1), \quad (17)$$

$$V_{K_{np}} = \frac{1 - k_r}{1 - K_r(t_D)} = \ell^{\mu t_D}, \quad (18)$$

$$V_{\bar{T}_B} = \frac{\bar{t}_B}{\bar{T}_B(t_D)} = \frac{1 + \mu t_D}{1 + 0,5 \mu t_D}, \quad (19)$$

$$V_{\bar{T}_{vo}} = \frac{\bar{t}_{mo}}{\bar{T}_{mo}(t_{DI})} = \frac{1 + \theta t_{DI}}{1 + 0,5 \theta t_{DI}}, \quad (20)$$

де $Q(t, t_D) = 1 - P(t, t_D)$ – вірогідність відмови (зриву функціонування) системи.

Формула (16) отримана при $F(t) = 1 - \exp(1 - \lambda t)$ і довільному розподілі $F_B(t) = P\{t_B < t\}$ випадкової величини t_B ; формули (17) і (18) – при експоненціальному розподілі напрацювання об'єкта між відмовами і часу відновлення з параметрами λ і μ відповідно, формули (19) і (20) – при розподілі випадкових величин t_B і t_{mo} згідно із законом Ерланга 2-го порядку з параметрами $\mu = \frac{2}{t_B}$ і $\theta = \frac{2}{t_{vo}}$ відповідно.

Як видно з формул (19) і (20), за рахунок використання резервів часу при відновленні працездатності об'єкта і проведенні ТО скорочується тривалість простоїв системи на ремонт і на ТО. Зі збільшенням резерву часу t_D (t_{DI}) середній час відновлення працездатності системи $\bar{T}_B(\tau_D)$ (або тривалість проведення ТО $\bar{T}_{mo}(\tau_{DI})$) монотонно зменшується від початкового значення t_B (або t_{mo}) при $t_D = 0$ (або $t_{DI} = 0$). При $t_D \rightarrow \infty$ (або $t_{DI} \rightarrow \infty$) величина $\bar{T}_B(\tau_D)$ (або $\bar{T}_{mo}(\tau_{DI})$) прямує до деякої межі, яка залежить від виду ФР $F_B(t)$ (або $\Phi(t)$). Зокрема в даному випадку, коли випадкові величини t_B або t_{mo} розподілені за законом Ерланга 2-го порядку з параметром $\mu = \frac{2}{t_B}$ (або $\theta = \frac{2}{t_{vo}}$), ця межа складає $\frac{\bar{t}_B}{2}$ (або $\frac{\bar{t}_{mo}}{2}$).

Таким чином, використання резервів часу при відновленні працездатності об'єкта та проведенні ТО є одними з перспективних шляхів забезпечення потрібного рівня надійності, тому що це в переважній більшості випадків може призвести до підвищення комплексного показника надійності – коефіцієнта технічного використання об'єктів. Незважаючи на наявність окремих теоретичних робіт, що виконані в цьому напрямку, ціла низка питань залишається не дослідженою. Так, відомі моделі ТО не повною мірою враховують усю різноманітність експлуатаційних чинників: режими використання і характер функціонування об'єктів, види надмірності, що використовуються, та методи резервування, характеристики контролю технічного стану й ін. Недостатньо досліджені питання порівняльної оцінки ефективності різних видів ТО і взаємопов'язаного впливу вказаних вище чинників, зокрема почасової та структурної надмірності, на показники надійності. Це тим більше важливо, що такий комплексний підхід до дослідження надійності систем, які обслуговуються з надмірностями, приводить до нових якісних і кількісних результатів, що відкривають важливі властивості та особливості таких систем. Проведене в даній статті формалізоване подання загальних принципів використання наявних у конструкції та системі експлуатації складних технічних систем резервів покладено в основу розробки математичних моделей надійності та експлуатації резервованих систем.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Введено вперше; Введ. 28.12.94. – К.: Держстандарт України, 1994. – 40 с.
2. Барзилович, Е. Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Е. Ю. Барзилович, В. Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 196 с.

3. Смирнов, Н. Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по техническому состоянию / Н. Н. Смирнов, А. А. Ицкович. – М. : Транспорт, 1980. – 232 с.
4. Креденцер, Б. П. Оптимизация избыточности в сложных технических системах. Основные вопросы теории и практики надёжности / Б. П. Креденцер. – Минск. : Наука и техника, 1982. – 674 с.
5. Модели технического обслуживания систем с избыточностью / Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, М. И. Резников, В. В. Зубарев; под ред. Б. П. Креденцера. – К. : Фенікс, 2002. – 192 с.
6. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. П. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
7. Черкесов, Г. Н. Надёжность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М. : Сов. радио, 1974. – 296 с.