УДК 621.3

д-р техн. наук Кузавков В. В. ORCID: 0000-0002-0655-9759 (ВІТІ)
Михайлюк С. С. (ВІТІ)
Погребняк С. В. ORCID: 0000-0002-9104-7781 (ВІТІ)

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ З НАДЛИШКОВІСТЮ

До складу складних технічних систем належить ефективність функціонування радіоелектронної техніки, яка залежить від надійності їх підсистем та елементів.

У статті показано, що надмірність, яка широко застосовується для забезпечення нормального функціонування складних систем у реальних умовах експлуатації, є фундаментальним поняттям у загальній теорії й практиці надійності. Наведено класифікацію і дана характеристика основних методів резервування як способу підвищення надійності, відзначено їхні достоїнства й недоліки та зроблено висновок про доцільність комплексного використання різних видів надмірності.

Ключові слова: *надійність, об'єкти радіоелектронної техніки, надмірність, резервування.*

V. Kuzavkov, S. Mykhailiuk, S. Pogrebnyak. Analysis of reliability parameters of radio electronic equipment facilities with redundancy

The composition of complex technical systems includes the effectiveness of the functioning of electronic equipment, which depends on the reliability of their subsystems and elements.

The article defines the basic concepts of reliability theory. It is shown that redundancy, which is widely used to ensure the normal functioning of complex systems in real operating conditions, is a fundamental concept in the general theory and practice of reliability. The classification and characteristics of the main redundancy methods are given as a way of increasing reliability, their merits and demerits are noted, and a conclusion is drawn about the expediency of the comprehensive use of various types of redundancy.

Keywords: *reliability, objects of radio-electronic equipment, redundancy, redundancy.*

Постановка завдання

Розглянуто особливості елементної та структурної надійності об'єктів радіоелектронної техніки.

Аналіз останніх публікацій

У спеціальній науковій літературі розглядаються загальні підходи до системотехнічного проєктування телекомунікаційних мереж [1], а також їх математичні моделі і методи аналізу надійності [2–5]. Відповідно до загальної практики, оцінка кількісних значень показників надійності об'єктів радіоелектронної техніки проводиться як на етапах проєктування, так і під час її експлуатації.

Сучасні об'єкти радіоелектронної техніки відносяться до великих систем. Прикладами складних систем можуть служити: телекомунікаційні мережі; радіолокаційні системи; різні види автоматизованих систем, призначених для вдосконалення організації та управління процесами обробки інформаційних потоків (автоматизовані системи управління процесами тощо).

Питання особливостей побудови та аналізу поведінки великих систем розглядаються в [4], а підходи та приклади практичної реалізації методик кількісної оцінки показників надійності об'єктів радіоелектронної техніки розглядаються в [6–8]. Зокрема, в [9; 10] наводяться способи підвищення якості функціонування складних систем, а питання кількісної оцінки структурної надійності об'єктів радіоелектронної техніки досліджені в [10; 11].

Метою статті є аналіз параметрів надійності для об'єктів радіоелектронної техніки з надлишковістю при повній вихідній інформації.

Виклад основного матеріалу

Найбільш повною характеристикою будь-якої складної технічної системи є її якість – сукупність властивостей, які обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до свого призначення протягом установленого часу. Цю сукупність властивостей можна умовно розбити на дві групи характеристик:

ті, які визначають можливості системи виконувати певні функції відповідно до свого призначення за умови, та які визначають здатність системи зберігати свої можливості в заданих межах за певних умов експлуатації, а також почасові, матеріальні й трудові витрати на підтримку системи в працездатному стані;

експлуатаційно-технічні характеристики. До їхнього числа відносять показники надійності систем, характеристики контролю працездатності, обслуговування та ремонту, повноти й достатності запасного майна і приладів та інші характеристики.

Із визначення й складу експлуатаційно-технічних характеристик можна зробити наступні висновки, що забезпечення високих експлуатаційно-технічних характеристик апаратури є не самоціллю, а засобом забезпечення високої надійності, тобто високої ефективності систем.

Існуюча залежність між надійністю та іншими експлуатаційно-технічними властивостями системи є основою комплексного підходу до розрахунку й забезпечення основних експлуатаційно-технічних характеристик, який полягає в одночасному і взаємозалежному їхньому дослідженні на всіх етапах розробки, випробувань і експлуатації нових систем.

У загальному випадку надійність – це комплексна властивість, яка залежить не тільки від показників апаратурної надійності, але визначається також характером навантаження на систему й цілим рядом організаційно-технічних заходів і факторів, які впливають на загальний процес функціонування системи: режимами технічного обслуговування, якістю контролю, структурою й організацією системи ремонту тощо.

Урахування всіх цих факторів при розрахунках показників надійності дозволяє не тільки більш повно враховувати реальні можливості систем, а також більш обґрунтовано обирати шляхи та методи забезпечення їхнього нормального функціонування в процесі тривалої експлуатації.

У теорії надійності використовуються наступні поняття стану об'єкту контролю: працездатний, непрацездатний.

Працездатний стан (працездатність) – стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції.

Непрацездатний стан (непрацездатність) – стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоч би одну з потрібних функцій.

Основною подією, яка пов'язана зі зміною стану об'єкта, є відмова. Поняття відмови є фундаментальним у теорії й практиці надійності. З її визначення повинне починатися будь-яке дослідження надійності технічних систем. Критерій відмови – ознака чи сукупність ознак порушення працездатного стану об'єкта, встановлені у нормативній та (або) конструкторській (проєктній) документації.

У поняття складної системи зазвичай вкладають наступний зміст:

складну систему можна розчленувати на кінцеве число підсистем, а кожну підсистему, у свою чергу, – на кінцеве число більш простих підсистем тощо, доти, поки не одержимо елементи системи (під елементами системи розуміють об'єкти, які в умовах даної задачі не підлягають розчленовуванню на частини);

елементи складної системи функціонують у взаємодії один з одним;

властивості складної системи визначаються не тільки властивостями окремих елементів, але й характером взаємодії між елементами.

Таким чином, відмінними рисами складної системи є наявність великої кількості взаємозалежних і певним чином взаємодіючих між собою різнорідних елементів.

Забезпечення надійності складних технічних систем являє собою єдиний процес, що охоплює всі основні етапи їхнього життєвого циклу. Отже, забезпечення високої надійності складних технічних систем – це комплексна проблема, що охоплює широке коло наукових (математичних, фізико-технічних, біологічних), інженерних (проєктно-конструкторських, експлуатаційних) й економічних аспектів. Рішення цієї проблеми пов'язане з реалізацією численних організаційних і технічних, а часто і фундаментальних наукових досліджень, що вимагають великих витрат часу та коштів і дотичних різних галузей науки, техніки та народного господарства.

Як відомо з [12–15], при досягнутих рівнях надійності комплектуючих елементів й якості проєктно-конструкторських і виробничо-технологічних робіт основним шляхом забезпечення надійності складних систем є введення різних видів надмірності. Тому поняття надмірності є фундаментальним у загальній теорії надійності.

Під надмірністю розуміють сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, які використовуються для забезпечення нормального функціонування складних систем в умовах впливу дестабілізуючих внутрішніх і зовнішніх факторів. У цей час розрізняють і використовують для забезпечення надійності п'ять видів надмірності: структурну, інформаційну, функціональну, навантажувальну й почасову.

Резервування – спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання надмірності.

Резерв – сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, використовуваних для резервування.

Серед існуючих методів резервування вже діючих систем особливу увагу приділяємо функціональному та навантажувальному резервуванню, при якому використовується здатність елементів об'єкта виконувати додаткові функції (при функціональному резервуванні) або сприймати додаткові навантаження понад номінальні (при навантажувальному резервуванні).

Ці види резервування звичайно утворяться в складних просторово-рознесених системах за рахунок структурного й функціонального ускладнення апаратури і зв'язку між її елементами, а також шляхом раціональної організації застосування систем. Труднощі практичного використання даних видів надмірності пов'язані з необхідністю в ряді випадків додаткового перетворення форми інформації, погіршенням її точності й вірогідності, зниженням пропускної здатності тощо.

Кожен з видів резервування окремо має певні достоїнства й недоліки, які необхідно враховувати при виборі й обґрунтуванні методів підвищення надійності. Разом з тим, дослідження показали [12–15], що ефективність введення надмірності, як методу підвищення надійності, може бути істотно підвищена при комплексному використанні різних її видів. Об'єктивна можливість і необхідність такого підходу обумовлена наступними причинами:

у багатьох технічних об'єктах реально існують різні види надмірності, передбачені при проєктуванні, які володіють не тільки частковими, але й загальними властивостями відносно впливу на надійність. Тому вивчення надмірності, її видів, способів введення й використання, її ролі й місця в загальній програмі забезпечення надійності повинне проводитися комплексно з єдиних методологічних позицій;

у багатьох випадках один вид надмірності (наприклад, структурна, інформаційна, функціональна або навантажувальна) може служити засобом, що забезпечує наявність у системі іншого виду надмірності (наприклад, почасової);

спільне використання різних видів надмірності дає можливість частково компенсувати недоліки, які властиві окремим видам, і підсилити їхні достоїнства. При цьому виграш у надійності не є мультиплікативною функцією виграшів, що досягаються в системі з одним видом надмірності, а істотно більшою.

Для того щоб властивості надійності можна було «вимірювати» (оцінювати), введено кількісні показники надійності – кількісні характеристики одного або декількох властивостей, які визначають надійність. Розрізняють одиничні показники надійності, які характеризують одну із властивостей, і комплексні показники, які характеризують кілька властивостей, що визначають надійність об'єкта.

Для кількісної оцінки безвідмовності використовуються одиничні показники, основні з яких приводяться нижче.

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – це імовірність того, що в межах заданого напрацювання t відмова об'єкта не виникне, тобто:

$$P(t) = Імов\{t_н \geq t\},\ t \geq 0,$$

де $t_н$ – випадкова величина, що характеризує напрацювання до відмови.

Імовірність протилежної події є *імовірність відмови*

$$F(t) = Імов\{t_н < t\}.$$

Очевидно, що $P(t) + F(t) = 1$,

де $F(t)$ – інтегральна функція розподілу випадкової величини $t_н$.

Щільність розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ можна одержати як похідну від функції розподілу $F(t)$:

$$f(t)=\frac{dF(t)}{dt}=-\frac{dP(t)}{dt},$$

звідки знаходимо:

$$F(t)=\int_0^t f(u)du,\quad P(t)=\int_t^\infty f(u)du.$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – це умовна щільність імовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, обумовлена за умови, що до розглянутого моменту часу t відмова не виникла.

Відповідно до визначення:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{P(t)}=\frac{1}{1-F(t)}\frac{dF(t)}{dt}=-\frac{1}{P(t)}\frac{dP(t)}{dt}.$$

Середнє напрацювання до відмови – це математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови:

$$T_0=\int_0^\infty tf(t)dt. \qquad (1)$$

Провівши інтегрування в (1) по частинах, отримаємо:

$$T_0=\int_0^\infty P(t)dt=\int_0^\infty (1-F(t))dt.$$

Середнє напрацювання на відмову $T_н$ – це відношення сумарного напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього напрацювання, тобто:

$$T_н=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_{нi},$$

де $t_{нi}$ – напрацювання об'єкта між $(i-1)$ і i-ю відмовами;

n – математичне сподівання числа відмов протягом сумарного напрацювання.

Властивість ремонтопридатності об'єктів прийнято «вимірювати» часом приведення об'єкта в працездатний стан – часом відновлення $t_в$, що є випадковою величиною. Тому показники ремонтопридатності використовують такі ж імовірнісні характеристики, як і у випадку безвідмовності, а саме: $F_в(t)$ – імовірність відновлення у заданий час; $f_в(t)$ – щільність розподілу часу відновлення; $\mu(t)$ – інтенсивність відновлення; $T_в$ – середній час відновлення.

Імовірність відновлення в заданий час $F_в(t)$ – це імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить задане значення:

$$F_в(t)=Імов\{t_в\le t\}.$$

Так само як і $F(t)$, $F_в(t)$ – це функція розподілу випадкової величини $t_в$. Імовірність невідновлення в заданий час:

$$Імов\{t_в>t\}=1-F_в(t).$$

За аналогією зі щільністю $f(t)$ щільність розподілу часу відновлення $F_в(t)$ виражається формулою:

$$f_в(t)=\frac{dF_в(t)}{dt}.$$

Інтенсивність відновлення $\mu(t)$ – це умовна щільність імовірності відновлення працездатності об'єкта, певна для розглянутого моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено. Відповідно до визначення:

$$\mu(t)=\frac{f_{\text{в}}(t)}{1-F_{\text{в}}(t)}.$$

Середній час відновлення $T_{\text{в}}$ – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови, тобто:

$$T_{\text{в}}=\int_0^\infty t f_{\text{в}}(t)dt=\int_0^\infty\left[1-F_{\text{в}}(t)\right]dt.$$

Показники довговічності можна умовно розділити на дві групи. Показники першої групи основані на терміні служби, а показники другої – на понятті «ресурс». До цих показників відносять середній термін служби, гамма-процентний термін служби, середній ресурс і гамма-процентний ресурс.

Показниками збережуваності є середній термін зберігання й гамма-процентний термін зберігання. Визначення показників довговічності й збережуваності приводяться в ДСТУ 2860-94 [5].

Відзначимо, що всі розглянуті вище показники надійності є одиничними й дозволяють кількісно оцінювати тільки окремі властивості надійності. Крім них у цей час широко використовуються комплексні показники, що враховують дві властивості надійності – безвідмовність і ремонтопридатність. Такими комплексними показниками надійності є: нестаціонарний $K_{\text{г}}(t)$ і стаціонарний $K_{\text{г}}$ коефіцієнти готовності; $K_{\text{тв}}$ – коефіцієнт технічного використання; $K_{\text{ог}}(t)$ – коефіцієнт оперативної готовності.

Згідно з ДСТУ 2860-94 [5] нестаціонарний коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}(t)$ залежить від часу. У сталому режимі функціонування об'єкта (при $t\to\infty$) ця залежність від часу зникає й ми приходимо до стаціонарного коефіцієнта готовності $K_{\text{г}}$.

Стаціонарний коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$ – це значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середній час відновлення залишаються постійними:

$$\lim_{t\to\infty}K_{\text{г}}(t)=K_{\text{г}}=\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{н}}+T_{\text{в}}}. \qquad (2)$$

Формула (2) добре відображає фізичну сутність коефіцієнта готовності як відносну частку часу, протягом якого об'єкт перебуває в працездатному стані.

У ряді випадків використовується такий показник як коефіцієнт простою $K_{\text{пр}}$, що характеризує відносну частку часу, протягом якого об'єкт перебуває в непрацездатному стані, тобто:

$$K_{\text{пр}}=1-K_{\text{г}}=\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{н}}+T_{\text{в}}}.$$

Коефіцієнт технічного використання $K_{\text{тв}}$ – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані $\text{M}[t_{\text{пр}\Sigma}]$ за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані $\text{M}[t_{\text{пр}\Sigma}]$ та у простоях, обумовлених технічним обслуговуванням $\text{M}[t_{\text{то}\Sigma}]$ і ремонтом $\text{M}[t_{\text{в}\Sigma}]$ за той же період:

$$K_{\text{тв}}=\frac{\text{M}[t_{\text{пр}\Sigma}]}{\text{M}[t_{\text{пр}\Sigma}]+\text{M}[t_{\text{то}\Sigma}]+\text{M}[t_{\text{в}\Sigma}]}.$$

Розглянуті вище комплексні показники $K_{\text{г}}$ і $K_{\text{тв}}$ є характеристиками надійності, усередненими для тривалого періоду експлуатації. У багатьох випадках цього виявляється недостатньо, тому що виникає необхідність оцінки можливості виконання об'єктом деякої

задачі (функції), що вимагає безперервної безвідмовної роботи об'єкта в ході заданого часу. Для оцінки такої можливості введено показник – коефіцієнт оперативної готовності.

Коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{ог}}(t, t+t_0)$ – це імовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу t, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається, і, починаючи із цього моменту, буде виконувати необхідну функцію протягом заданого інтервалу часу $(t, t+t_0)$.

Для сталого режиму експлуатації (при $t \to \infty$) і довільних законах розподілу випадкових величин t_i і $t_{\text{в}}$ справедлива наступна формула для коефіцієнта оперативної готовності:

$$\lim_{t\to\infty} K_{\text{ог}}(t, t+t_0) = K_{\text{ог}}(t_0) = \frac{1}{T_{\text{н}} + T_{\text{в}}} \int_{t_0}^{\infty} [1 - F(t)]dt, \qquad (3)$$

де $F(t)$ – функція розподілу напрацювання об'єкта між відмовами.

При $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ формула (3) приймає наступний вид:

$$K_{\text{ог}}(t_0) = K_{\text{г}} e^{-\lambda t_0} = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{н}} + T_{\text{в}}} e^{-\frac{t_0}{T_0}}.$$

Висновки

У статті визначено основні одиничні і комплексні показники надійності, проведено розрахункові співвідношення. Серед існуючих методів підвищення показників надійності обрано метод функціонального та навантажувального резервування.

Напрямком подальшої роботи є підвищення живучості угруповання телекомунікаційних засобів та її підвищення шляхом використання всіх видів надлишковості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волочій Б. Ю. Системотехнічне проектування телекомунікеаційних мереж. Практикум: навч. посіб. / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 128 с.

2. Бобало Ю. Я. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Монографія / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербаковських, В. С. Яковина. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с.

3. ДСТУ В 3265-95. Зв'язок військовий. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України. 40 с.

4. Денисов А. А. Теория больших систем управления: учеб. пособ. / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. Ленинград: Энергоиздат. 288 с.

5. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України. 76 с.

6. Глазунов Л. П. Основы теории надежности автоматических систем управления: учеб. пособ. / Л. П. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. Ленинград: Энергоиздат. 208 с.

7. Маслов А. Я. Эксплуатация автоматизированных систем управления. Воениздат, 1984. 485 с.

8. Нетес В. А. Надежность сетей связи: тенденции последнего десятилетия // Электросвязь. 1998. № 1. С. 25–27.

9. Хиленко В. В. Проблеми розбудови і підвищення якості мережі спільноканальної сигналізації: структурна надійність мережі // Зв'язок. 2002. № 6. С. 21–25.

10. Рижаков В. А. Кількісне оцінювання структурної надійності систем зв'язку // Зв'язок. 2004. № 4. С. 53–57.

11. Харыбин А. В. О подходе к решению задачи выбора методологии оценки структурной надежности и живучести информационных систем критического применения // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2006. № 6918. С. 61–71.

12. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України. 30 с.

13. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Київ: Держстандарт України. 123 с.

14. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Київ: Держстандарт України. 42 с.

15. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. Київ: Держстандарт України. 21 с.