

УДК 681.5.03, 004.7

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.069966

С. М. ПЩЕРЯКОВ, канд. техн. наук, доцент;

С. В. ПРОКОПОВ, канд. техн. наук, доцент;

Ю. В. КАРГАПОЛОВ, ст. викладач;

Ю. В. БЕРЕЗОВСЬКА, аспірант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ФУНКЦІОНАЛЬНА СТІЙКІСТЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ОБМЕЖЕНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО НАДІЙНІСТЬ

Розглянуто комплекс тісно пов'язаних між собою задач, об'єднаних спільною метою дослідження: побудувати двосторонні оцінки показників надійності інформаційних систем під час різних способів уведення і використання резерву часу за наявності обмеженої апріорної інформації про надійність.

Ключові слова: інформаційна система; мережа; функціональна стійкість; надійність; обмежена апріорна інформація; резерв часу.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні інформаційні системи (ІС) — це складні технічні системи, які є об'єднанням робочих місць користувачів, приладів доступу до інформаційної мережі, фізичної мережі та керуючої системи, а також програмного забезпечення. Тобто ІС являє собою організовану належним чином сукупність технічних засобів для оптимізації інформації (передавання, зберігання, оброблення) з метою забезпечення виконання основних функцій мережі з високою якістю за принципом 24/7 для підтримання ефективної роботи.

Функціональна стійкість (ФС) є одним із основних показників якості ІС [1–5] і залежить від багатьох чинників. Для ФС переважними чинниками є надійність та ефективне керування [9; 10]. До того ж забезпечення надійності та можливість усунення несправності ІС має відбуватись у такий спосіб, щоб це не впливало на якість надання інформаційних послуг споживачеві. Вирішення даних завдань покладено на засоби забезпечення функціональної стійкості ІС. Гарантування заданих параметрів у процесі побудови ІС є комплексною науково-технічною проблемою, що зумовлено цілою низкою чинників. Особливо варто наголосити на складності оцінювання показників надійності обладнання ІС, виготовленого різними виробниками, а також потрібно виокремити питання, пов'язані з ефективністю керування. Причому ІС має забезпечити якість надання послуг кінцевому користувачу та працювати цілодобово. Це пов'язано не тільки з використанням різними розробниками різноманітних методик для оцінювання роботи ІС, а й відмітною природою впливів на інформаційну мережу.

Таким чином, достатньо чітко визначено суперечність між принциповою можливістю розроблення високоефективних функціонально стійких інформаційних систем і недостатньою ефективністю наявних систем, які не забезпечують відповідний рівень функціональної стійкості елементів мережі за принципом 24/7.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні та інших країнах світу нині досить інтенсивно проводяться дослідження в галузі інформаційних мереж. Проблеми забезпечення функціональної стійкості присвячено праці таких науковців, як О. А. Машков, В. І. Гостев, О. В. Барабаш. До речі, уперше поняття функціональної стійкості було введено професором Машковим О. А.

Питання, що стосуються вдосконалення надійності систем, детально розглянуто у роботах таких вчених: Б. П. Креденцер, М. К. Жердев, Л. С. Стойкова та ін., а забезпечення ефективного керування докладно розглянуто в роботах Л. Н. Беркман, В. К. Стеклова та ін.

Постановка завдання. Для визначення процесу функціональної стійкості інформаційних систем із резервом часу у статті розглядаються задачі оцінювання показників надійності ІС епізодичного використання з резервом часу при фіксованих моментах розподілів випадкових величин.

Інформаційна система може використовуватися за призначенням не тільки неперервно, а й епізодично. У цьому разі вона виконує завдання, що надходять у випадкові моменти часу. У таких системах резерв часу, що поповнюється, передбачено в самій системі, використовується нарівні з випадковим резервом часу, зумовленим характером надходження завдань (цей резерв часу визначається від моменту появи відмови елемента або ІС до моменту надходження завдання).

У задачах, пов'язаних із функціональною стійкістю інформаційних систем, необхідно мати гарантовані оцінки показників надійності за наявності обмеженої апріорної інформації про закони розподілів визначальних випадкових величин. Під гарантованою оцінкою розуміємо нижню або верхню межу зміни значень показників надійності. Якщо під час формалізації задачі вдається подати показник

надійності ІС як інтеграл імовірностей або сукупність таких інтегралів, то стає можливим залучити для відшукування двосторонніх оцінок метод розв'язання екстремальних задач, викладений у [6].

Сформулюємо вихідні передумови і припущення, при яких розв'язується задача оцінювання показників надійності ІС з резервом часу:

- наробка об'єкта між відмовами окремого основного елемента або навантаженого резервного елемента розподілена за експоненціальним законом $F(t) = P\{t_H < t\}$ із параметром λ і не залежить від номера відмови;
- інтенсивність λ_p відмов окремого резервного елемента залежить від ступеня його навантаження, тобто $\lambda_p = \alpha\lambda$, де $\alpha = 1$ під час повного навантаження, $0 < \lambda < 1$ у разі неповного навантаження (полегшений режим) та $\alpha = 0$ за відсутності навантаження (ненавантажений режим);
- ремонт елемента, що відмовив, повністю відновлює його вихідні властивості;
- у разі відмови $(m + 1)$ -го елемента об'єкт вимикається і нові відмови не виникають, система відновлює свою роботу після закінчення ремонту одного з $(m + 1)$ непрацездатних елементів;
- тривалість ремонту набагато менша за наробку елемента між відмовами ($t_B \ll t_H$);
- резерв часу τ_d і тривалість підімкнення t_{Π} резервного елемента замість основного значно менші, ніж наробка елемента між відмовами ($\tau_d \ll t_H$, $t_{\Pi} \ll t_H$) і часом відновлення ($\tau_d \ll t_B$, $t_{\Pi} \ll t_B$);
- час відновлення t_B одного елемента, час підімкнення t_{Π} резервного елемента замість основного, який відмовив, тривалість z проміжків часу між моментами надходження завдання під час епізодичного використання системи, резерв часу τ_d , що поповнюється, розподілено за законами відповідно $F_B(t)$, $F_{\Pi}(t)$, $A(t)$, $D(t)$, інформація про які може бути обмежена (у разі невідомого виду функції розподілу (ФР) фіксовані тільки моменти розподілу цих випадкових величин, наприклад математичного сподівання і дисперсії).

З огляду на ці припущення можна знехтувати затримкою ІС щодо працездатних станів на час $\min[t_B(t_{\Pi}), \tau_d]$ при відмовах основних елементів і вважати, що після відмови $(m + 1)$ -го елемента жоден з $(m + 1)$ елементів не встигне відновитися і під'єднатися до роботи за допустимий час. Уже згадана ІС може відмовити в двох випадках: у разі відмови $(m + 1)$ -го основного елемента або в момент, коли тривалість підімкнення резервного елемента в роботу (або відновлення основного) перевищить резервний час.

Для інформаційних систем із відомими видами і параметрами законів розподілу в роботах [6–8] здобуто точні й наближені формули для основних показників надійності — ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, \tau_d)$, середньої наробки на відмову системи $T_0(\tau_d)$, середнього часу відновлення $T_B(\tau_d)$, коефіцієнта готовності $K_T(\tau_d)$ тощо.

Наукове завдання полягає в тому, щоб дістати розрахункові співвідношення для показників надійності за наявності обмеженої апріорної інформації про закони розподілу випадкових величин, що описують функціональну стійкість інформаційних систем. Сутність розв'язання сформульованої задачі полягає в спільному використанні відомих розрахункових співвідношень для показників надійності і двосторонніх оцінок лінійних і дробово-лінійних функціоналів, які отримано в [6].

З методичного погляду розв'язання цієї задачі доцільно здійснити окремо для різних класів систем із резервом часу, що поповнюється (у даній статті для ІС епізодичного використання).

У всіх випадках двосторонні оцінки показників надійності побудовано для різного ступеня обмеженості апріорної інформації щодо законів розподілу визначальних випадкових величин.

Основна частина

Розглянемо ІС, в якій об'єкт подано одним неперервно використовуваним узагальненим структурним елементом ($n = 0$, $m = 0$). Контроль працездатності цього елемента передбачається ідеальним (повним, неперервним і вірогідним).

Нехай відмови об'єкта виникають тільки в робочому режимі й лише з підстав, зумовлених цим режимом. Момент відновлення системи, якщо він настане раніше, ніж вичерпається резерв часу, є точкою регенерації стохастичного процесу, що описує функціонування ІС з часовим резервуванням [6], а сам процес буде регенеруючим із періодом, який складається з двох незалежних частин: $\xi = \xi_1 + \xi_2$, де ξ_1 , ξ_2 — випадкова величина з відповідно експоненціальним і довільним розподілом. У моделі функціонування ІС з резервом часу перша частина періоду ξ_1 — це інтервал, протягом якого об'єкт працездатний, а друга частина ξ_2 — це інтервал, на якому виникає відмова об'єкта і відбувається його відновлення. Критерієм відмови таких ІС є виконання умови перевищення випадковою величиною t_B (часом відновлення) резервного часу τ_d або t_d (тобто відмова ІС з резервом часу може статися тільки на другій частині періоду регенерації). Імовірність цієї події можна подати так:

$$q = P\{t_B > \tau_d\} = \int_0^{\infty} [1 - F_B(t)] D(t) dt. \quad (1)$$

У разі $\tau_D = t_D = \text{const}$ маємо:

$$q = P\{t_B > t_D\} = 1 - F_B(t_D). \tag{2}$$

Відмітною особливістю цілої низки інформаційних систем є й те, що вони використовуються не перервно, а епізодично, тобто виконують завдання, що надходять у випадкові моменти часу. Проміжки часу між надходженнями завдань є випадковою величиною z з ФР $A(t) = P\{z < t\}$. Це можуть бути автомобільні мережі VANET, які висувають високі вимоги до затримок, центри оброблення даних, що працюють у реальному масштабі часу, системи зв'язку тощо.

У разі повної апріорної інформації (відомих видах і параметрах ФР $F_B(t) = P\{t_B < t\}$ і $D(t) = P\{\tau_D < t\}$) у роботі [6] здобуто розрахункові співвідношення для ймовірності, які використовуються в процесі обчислення формул для основних показників надійності ІС. А за наявності обмеженої апріорної інформації про надійність (коли відомі тільки початкові моменти розподілів визначальних випадкових величин) у [6] побудовано двосторонні оцінки функціоналів виду (1) або (2).

Проаналізуємо деякі типові ситуації, які характеризують випадки інформативності щодо випадкових величин t_B і t_D , котрі часто зустрічаються на практиці, та визначимо для них верхні й нижні оцінки для ймовірності q .

Розглянемо дві моделі ІС: епізодичного використання з часовим резервуванням, послуговуючись вищезгаданими передумовами наявності інформації тільки про початкові моменти розподілів визначальних випадкових величин, і відомих розрахункових співвідношень для основних показників надійності систем із часовим резервуванням різного класу.

Першу модель ІС подано одним узагальненим структурним елементом, а резерв часу забезпечується тільки завдяки випадковому режиму використання об'єкта. Цей час є випадковою величиною, яка визначається від моменту виникнення відмови до моменту надходження завдання. Тривалість виконання завдання настільки мала порівняно з наробкою об'єкта на відмову, що нею можна практично знехтувати. Формули для наробки системи на відмову $\bar{T}_0(z_*)$ і ймовірності безвідмовної роботи $P(t, z_*)$ набирають такого вигляду [6]:

$$\bar{T}_0(z_*) \approx \bar{t}_H / q, \tag{3}$$

$$P(t, z_*) \approx \exp(-qt / \bar{t}_H), \tag{4}$$

де q — імовірність того, що завдання надійде до того, як закінчиться відновлення ІС, що вийшла з ладу, тобто

$$q = P\{z_* < t_B\} = \int_0^\infty [1 - A^*(t)] dF_B(t),$$

де $A^*(t) = P\{z_* < t_B\} = \frac{1}{z} \int_0^t [1 - A(x)] dx.$

Двосторонні оцінки ймовірності q за наявності апріорної інформації тільки про моменти ФР $A(t)$ і $F_B(t)$ можуть бути обчислені за допомогою формул, здобутих у [6]. Так, при відомих моментах S_1 і S_2 ФР $A(t)$ можна дістати з виразів

$$\inf_{A(t) \in K_2} A^*(t) = \begin{cases} t \cdot \frac{S_1}{S_2}, & \text{якщо } t < \frac{S_2}{2S_1}, \\ \frac{1}{2S_1} \left(S_1 + t - \sqrt{t^2 - 2tS_1 + S_2} \right), & \text{якщо } t \geq \frac{S_2}{2S_1}, \end{cases}$$

$$\sup_{A(t) \in K_2} A^*(t) = \begin{cases} \frac{t}{S_1}, & \text{якщо } t < S_1, \\ 1, & \text{якщо } t \geq S_1. \end{cases}$$

Нехай у даній системі використовується резерв часу τ_D , що поповнюється, передбачений у самій системі. Відмова даної системи виникає тоді, коли резерв часу τ_D буде витрачено раніше, ніж закінчиться відновлення працездатності ІС. З огляду на це отримаємо для потрібних показників надійності такі наближені формули (3) і (4), якщо

$$q = P\{t_B > z + \tau_D\} = \int_0^\infty [1 - F_B(t)] dS(t),$$

де при $A(t) = P\{z < t\} = 1 - e^{-\gamma_3 t}$

$$S(t) = \int_0^t [1 - e^{-\gamma_3(t-x)}] dD(x), \quad D(x) = P\{\tau_D < x\}.$$

Скориставшись результатами [6], дістанемо

$$\inf_{D \in K_2} S(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } 0 < t < S_1, \\ \left(1 - e^{-\gamma_3 t}\right) \frac{t - S_1}{t}, & \text{якщо } S_1 \leq t < \frac{S_2}{S_1}, \\ \left(1 - e^{-\gamma_3(t-B(t))}\right) \frac{t - S_1}{t - B(t)}, & \text{якщо } t \geq \frac{S_2}{S_1}, \end{cases}$$

$$\text{де } B(t) = \frac{S_1 t - S_2}{t - S_1}.$$

У другій моделі збережемо постановку задачі, що сформульована в першій, але додатково вважати-мемо, що тривалість виконання завдання, яке надійшло — це випадкова величина t_3 з ФР $B(t)$. Отже, тут матимо справу з ІС тривалої дії [6], які можуть змінити свій стан (відмовити) за час виконання завдання з імовірністю, відмінною від нуля. Нехай наробка ІС між відмовами t_H і час між двома послідовними моментами надходження завдань z розподілені за експоненціальним законом із параметрами відповідно λ і γ_3 . Резерв часу забезпечується тільки завдяки випадковому режиму використання. Перерви у виконанні завдання не допускаються. У цьому разі гарантовані (найменші) межі $\bar{T}_0(z_*)$ і $P(t, z_*)$ під час моментних обмеженнях на ФР $F_B(t)$ і $B(t)$ можна дістати з виразів

$$\min \bar{T}_0(z_*) = \left[\lambda \left(1 - \inf_{F_B \in K} \tilde{F}_B(\gamma_3) \right) + \gamma_3 \left(1 - \inf_{B \in M} \tilde{B}(\lambda) \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$\min P(t, z_*) = \exp \left\{ -t / \min \bar{T}_0(z_*) \right\}, \quad (6)$$

$$\text{де } \tilde{F}_B(\gamma_3) = \int_0^{\infty} e^{-\gamma_3 t} dF_B(t); \quad \tilde{B}(\lambda) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dB(t).$$

Розглянемо випадок, коли в системі передбачено використання резерву часу, що поповнюється. Це означає, що допускається очікування закінчення завдання під час відновлення ІС протягом випадкового τ_D (або невідповідного $t_D = \text{const}$) резервного часу і можливі перерви, кількість яких не обмежується у виконанні завдання на час, що не перевищує значення τ_D (t_D).

Для випадку, коли $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$, $A(t) = 1 - \exp(-\gamma_3 t)$, $F_B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$, $B(t) = 1 - \exp(-\mu_3 t)$, вираз (5) набере такого вигляду:

$$\bar{T}_0 = \frac{\frac{1}{\gamma_3} \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} \left(1 - \frac{\gamma_3 \tilde{D}(\mu)}{\mu + \gamma_3} \right) \right] + K \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} (1 - \tilde{D}(\mu)) \right]}{1 + \frac{\lambda}{\mu + \gamma_3} - K \mu_3},$$

$$\text{де } K = \frac{1 + \frac{\lambda}{\mu + \gamma_3} (1 - \tilde{D}(\mu))}{\mu_3 + \lambda \tilde{D}(\mu)}; \quad \tilde{D}(\mu) = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} d\tilde{D}(t).$$

Отже, ґрунтуючись на результатах оцінювання лінійних і дробово-лінійних функціоналів здобуто сукупності розрахункових співвідношень для визначення гарантованих (найбільших і найменших) значень основних показників надійності ІС за наявності обмеженої апріорної інформації про розподіли визначальних випадкових величин, поданої початковими моментами. Такі розрахунки на стадії проектування складних ІС мають характер прогнозування, оскільки вони слугують обґрунтуванням передбачуваних показників надійності ІС, які ще не існують у реальному виконанні.

Висновки

Головним призначенням розрахунків для визначення гарантованих основних показників надійності ІС слід вважати:

- порівняльний аналіз різних конструктивних (схемних) варіантів ІС на стадії проектування для обґрунтованого вибору загальної структурної схеми, способів резервування, методів контролю та обслуговування тощо;
- прогнозоване оцінювання надійності системи для обґрунтування гарантованого висновку про те, що проєктована ІС може бути виготовлена за вимогами, які задовольняють норми ФС;
- орієнтовне оцінювання надійності ІС на етапі відпрацювання тестового зразка для обґрунтованого визначення термінів технічного обслуговування систем за умов апріорної невизначеності.

Список використаної літератури

1. Машков О. А., Самчишин О. В. *Современные проблемы развития теории функционально устойчивых сложных систем управления // Моделирование та інформаційні технології: зб. наук. праць. Київ: ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2009. Вип. 52.*
2. Дурняк Б. В., Машков О. А., Косенко В. Р. *Програмне забезпечення для математичного моделювання функціонально стійких інформаційно-керуючих комплексів динамічних об'єктів // Моделирование та інформаційні технології: зб. наук. праць. Київ: ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2010. Вип. 57. С. 201–217.*
3. Барабаш О. В. *Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем. Київ: НАУ, 2004. 226 с.*
4. *Аналіз застосування мереж Петрі для підтримки функціональної стійкості інформаційних систем / О. В. Барабаш, Н. В. Лукова-Чуйко, А. П. Мусієнко, О. Ю. Ільїн // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2018. № 1. С. 11–18.*
5. Барабаш О. В., Конозрай А. Ф., Саланда І. П. *Методика аналізу структурної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. № 3. С. 27–35.*
6. *Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія / Б. П. Креденцер [та ін.] / за ред. Б. П. Креденцера. Київ: Фенікс, 2013. 335 с.*
7. Стойкова Л. С., Красников С. Н. *Точные нижние границы вероятности отказа системы в интервале времени при неполной информации о функции распределения времени до отказа системы // Кибернетика и системный анализ. 2016. Т. 52, № 6. С. 84–94.*
8. Стойкова Л. С. *Наибольшая точная нижняя граница вероятности отказа системы в специальном интервале времени при неполной информации о функции распределения времени до отказа системы // Кибернетика и системный анализ. 2017. Т. 53, № 2. С. 65–73.*
9. Стеклов В. К., Костік Б. Я., Беркман Л. Н. *Сучасні системи керування в телекомунікаціях: монографія. Київ: Техніка, 2005. 400 с.*
10. *Керування телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій: підруч. для вищ. навч. закл. / В. Г. Кривуца, Л. Н. Беркман, В. К. Стеклов [та ін.]. Київ: Техніка, 2007. 383 с.*

С. М. Ищеряков, С. В. Прокопов, Ю. В. Каргаполов, Ю. В. Березовская

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ
ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕННОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ**

Рассмотрен комплекс тесно связанных между собой задач, объединенных общей целью исследования: построить двусторонние оценки показателей надежности информационных систем при различных способах введения и использования резерва времени при наличии ограниченной априорной информации о надежности.

Ключевые слова: информационная система; сеть; функциональная устойчивость; надежность; ограниченная априорная информация; резерв времени.

S. Ishcheryakov, S. Prokopov, Yu. Kargapolov, Yu. Berezovska

**FUNCTIONAL STABILITY OF INFORMATION NETWORKS
IN THE AVAILABILITY OF LIMITED A PRIORI INFORMATION ABOUT RELIABILITY**

In the article, based on the use of the results of evaluating of linear and fractional-linear functionals, sets of calculated ratios are obtained to determine the guaranteed (largest and smallest) values of basic of the reliability indicators of information systems in the presence of limited a priori information about the distributions of determining random variables which are represented by the initial moments. Such calculations at the design stage of complex information systems are predictable, because they serve as a grounding for the expected indicators of reliability of information systems that do not yet exist in real life.

The peculiarity of the considered information systems is that they are used not continuously, but sporadically. In this case they perform tasks that come at random times. In such systems, the replenished time reserve provided in the system itself is used along with the random time reserve due to the nature of the task (this time reserve is determined from the moment of failure of the element or information system until the receipt of the task). Examples of sporadic information systems are VANET car networks, which have high latency requirements, real-time data centers, and communication systems.

The main purpose of these calculations is as follows: a comparative analysis of various design (scheme) options for information systems at the design stage for a reasonable choice of the general structural scheme, methods of redundancy, methods of control and maintenance; a predicted assessment of the reliability of the system is given to substantiate the guaranteed conclusion that the designed information system can be manufactured according to the requirements that meet the requirements of functional stability; an approximate assessment of the reliability of information systems at the stage of testing a test sample for a reasonable determination of the terms of maintenance of systems in conditions of a priori uncertainty.

Keywords: information system; network; functional stability; reliability; limited a priori information; time reserve.