

## ОЦІНКА ВИГРАШУ В НАДІЙНОСТІ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВИКОРИСТАННІ НАДЛИШКОВОСТІ В ОБ'ЄКТАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

*Отримано сукупність розрахункових співвідношень, за допомогою яких проведена кількісна оцінка виграшу в надійності систем при спільному використанні структурного, часового та навантажувального резервування.*

*Креденцер Б.П., Могилевич Д.І., Кононова І.В. Оценка выигрыша в надёжности при комплексном использовании избыточности в объектах телекоммуникаций. Получена совокупность расчётных соотношений, с помощью которых проведена количественная оценка выигрыша в надёжности систем при совместном использовании структурного, временного и нагрузочного резервирования.*

*B. Kredentser, D. Mohylevych, I. Kononova An estimation of a prize in reliability at complex use of redundancy in objects of telecommunication. A set of calculated ratios has been obtained, with the help of which a quantitative estimate of the gain in the reliability of the systems has been made in the joint use of structural, temporal and loadable reserves.*

**Ключові слова:** надійність, надлишковість, резервування.

### Вступ.

Забезпечення надійності функціонування складних технічних систем (телекомунікаційних систем, автоматизованих систем управління, інформаційно-обчислювальних, вимірювальних комплексів та інших) являє собою єдиний процес, що охоплює всі основні етапи їх життя: проектування, виробництво, випробування та експлуатацію. При розробці передбачаються всі можливості для забезпечення надійності: при проектуванні встановлюються (прогнозуються) теоретичні значення показників надійності, а в процесі виготовлення і випробувань – статистичні оцінки показників кожного об'єкту. Як відомо, при досягнутих рівнях надійності комплектуючих елементів та якості проектно-конструкторських і виробничо-технологічних робіт основними шляхами забезпечення необхідної надійності функціонування складних технічних систем є введення різних видів надлишковості при розробці, а також вдосконалення принципів та організації технічного обслуговування і ремонту у процесі експлуатації.

Поняття надлишковості є фундаментальним в загальній теорії надійності. Вивчені на даний час властивості феномена надлишковості дозволяють вважати її найбільш ефективним засобом підвищення надійності. У зв'язку з цим використання надлишковості – необхідна умова забезпечення надійності майже будь-якої складної системи, призначеної для виконання відповідальних функцій.

Під надмірністю розуміють сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, які використовуються для забезпечення нормального функціонування складних систем в умовах впливу дестабілізуючих внутрішніх та зовнішніх факторів. Залежно від характеру додаткових засобів і можливостей, які використовуються для підвищення надійності, на даний час розрізняють п'ять видів надлишковості: структурну, інформаційну, функціональну, навантажувальну та часову. Вид надлишковості, що використовується, визначає метод резервування. Надамо коротку характеристику методів резервування.

*Структурне резервування* передбачає використання резервних елементів, що входять у фізичну структуру об'єкта. Даний вид резервування найбільш відомий, досить добре вивчений і широко використовується на практиці для підвищення надійності. Методи структурного резервування відрізняються універсальністю та дозволяють створювати із ненадійних елементів системи з необхідним рівнем надійності. Разом з тим у багатьох випадках схема реалізації цих методів пов'язана з низкою труднощів (не ідеальність перемикачів, перерозподіл навантаження при відмовах елементів, обмеження на вартість, вагу, габарити та ін.). Один з ефективних шляхів подолання цих труднощів є спільне використання структурної

та часової надлишковості з розробкою спеціальних засобів системного програмного забезпечення. Для оцінки показників надійності таких систем необхідно розробляти й досліджувати спеціальні моделі, що враховують наявність часової надлишковості.

*Інформаційне резервування* передбачає використання резервів інформації. У системах обробки та передачі інформації, що реалізують комплекси програм, інформаційна надлишковість полягає у дублюванні вихідних та проміжних даних. Надлишковість використовується для забезпечення достовірності даних, що найбільшою мірою впливають на нормальне функціонування комплексу програм та вимагають значного часу на відновлення. Основним недоліком цього виду резервування можна вважати ускладнення апаратури і алгоритмів функціонування, зниження продуктивності систем обробки та передачі інформації, а також збільшення вартості.

*Методи функціонального і навантажувального резервування* засновані на використанні здатності елементів об'єкта виконувати додаткові функції замість основних або наряду з ними і навантаження зверх номінальних для даного об'єкта. Ці види резервів зазвичай утворюються в складних просторово рознесених системах за рахунок структурного та функціонального ускладнення апаратури та зв'язків між її елементами, а також шляхом раціональної організації застосування таких систем. Труднощі практичного використання даних методів резервування пов'язані із необхідністю у ряді випадків додаткового перетворення форми інформації, погіршенням її точності та достовірності, зниженням пропускної здатності, тощо.

*Часове резервування* представляє собою метод забезпечення нормального функціонування об'єктів, що виконують певні задачі в умовах впливу різних збурень (відмов, збоїв, перешкод, тощо) шляхом призначення та використання резервного (надлишкового) часу [1 – 3]. Цей вид резервування виникає тоді, коли для об'єкта у процесі функціонування передбачено можливість витрати деякого часу для відновлення технічних характеристик. На відміну від інших видів надлишковості у даному випадку резервом є час. Цей резерв вноситься не в об'єкт, як, наприклад, при структурному резервуванні, а в порядок (алгоритм) використання (застосування) об'єкта, як це має місце при інформаційному або функціональному резервуванні. Особливістю зазначеного підходу до аналізу та забезпечення надійності складних технічних об'єктів полягає у „зважуванні” відмов за важливістю і ознакою витрачання часу на усунення їх наслідків. Це дозволяє розкрити і використовувати для підвищення надійності функціонування об'єктів внутрішні резерви (зокрема, часові), які закладені в самих об'єктах та алгоритмах їх використання за призначенням. Аналіз джерел резервів часу в реальних технічних системах наводиться в [2, 3]. Основним недоліком методів часового резервування є те, що поліпшення надійності функціонування супроводжується погіршенням деяких інших характеристик системи, зокрема, зменшенням реальної продуктивності, погіршенням точності, ускладненням алгоритмів функціонування, підвищенням вимог до апаратури контролю працездатності та пошуку дефектів.

Проведений вище аналіз показав, що кожен метод резервування окремо володіє певними перевагами та недоліками, які необхідно враховувати при виборі і обґрунтуванні методів підвищення надійності. Разом з цим, деякі результати дослідження показали [2 – 4], що ефективність введення надлишковості, як методу підвищення надійності, може бути істотно підвищена при комплексному використанні різних її видів. Об'єктивна можливість практичної реалізації принципу комплексного використання надлишковості зумовлена наступними причинами:

– у багатьох технічних об'єктах реально існують різні види надлишковості, які передбачені при проектуванні та володіють не тільки частковими, але й загальними властивостями щодо впливу на надійність; тому вивчення надлишковості, її видів, способів введення і використання, її ролі та місця в загальній програмі забезпечення надійності має проводитися комплексно з єдиних методологічних позицій;

– у багатьох випадках один вид надлишковості (наприклад, структурна, інформаційна або навантажувальна) може бути засобом, що забезпечує наявність в системі іншого виду

надлишковості (наприклад, часової);

– спільне використання різних видів надлишковості дає можливість частково компенсувати недоліки, властиві окремим видам, і посилити їх переваги, тобто такий шлях призводить до нових якісних та кількісних результатів, отримати які при іншому підході не вдається;

– при комплексному використанні надлишковості створюються найкращі умови для підвищення всіх основних показників надійності за рахунок покращення відновлюваності системи.

Остання обставина є істотною. Саме скорочення часу відновлення є тим головним чинником, який безпосередньо забезпечує підвищення ефективності всіх методів резервування.

**Аналіз публікацій в даній предметній області.** На даний час досить добре вивчені окремі методи резервування (зокрема, структурне, часове, інформаційне) [1 – 6]. Однак відносно мало отримано наукових результатів, які відображають особливості та властивості надлишковості при спільному використанні її різних видів, і практично відсутні кількісні оцінки ефекту в підвищенні надійності, що досягаються при цьому.

**Метою даної статті** є проведення кількісної оцінки виграшу в надійності при комплексному використанні різних видів надлишковості. Для проведення такої оцінки в статті отримано сукупність розрахункових співвідношень для показників надійності систем з часовим, структурним та навантажувальним резервуванням.

#### **Загальна постановка задачі.**

Розглянемо послідовно  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_5\}$  систем, де  $S_1$  – вихідна система, що складається з мінімального числа функціонально необхідних елементів (система без надлишковості);  $S_2$  – система з часовим резервуванням;  $S_3$  – система зі структурним резервуванням;  $S_4$  – система зі структурним та навантажувальним резервуванням;  $S_5$  – система, в якій передбачено сумісне використання структурного, навантажувального та часового резервування. Для кожної системи  $S_i$ ,  $i = \overline{1, 5}$ , відома (або задана) сукупність вихідних даних

$$S_i = \{A_i, B_i, C_i, R_i\}, i = \overline{1, 5},$$

де  $A_i$  – параметри, що характеризують структуру та взаємозв'язок елементів в системі;  $B_i$  – характеристики надійності елементів;  $C_i$  – параметри використовуваної надлишковості;  $R_i$  – параметри ремонтного органу.

Необхідно для кожної резервованої системи  $S_i$ ,  $i = \overline{2, 5}$ , оцінити виграш в надійності за показниками середнього напрацювання на відмову  $T_0$  та коефіцієнта готовності  $K_r$  за рахунок використання одного (часового або структурного) чи декількох одночасно (структурного та навантажувального або структурного, навантажувального і часового) видів резервування.

Обмеження та допущення будуть розглянуті нижче при отриманні формул для розрахунку  $T_0^{(i)}$  та  $K_r^{(i)}$ ,  $i = \overline{1, 5}$  кожної системи.

#### **Розрахункові співвідношення для $T_0^{(i)}$ та $K_r^{(i)}$**

**Система 1** (без надлишковості). Нехай в об'єкті певного цільового призначення з  $n \geq 1$  послідовно з'єднаних однотипних елементів інтенсивність відмов одного окремого елемента дорівнює  $\lambda$ , а час відновлення  $t_b$  – випадкова величина з функцією розподілу  $F_b(t) = P\{t_b < t\}$  та математичним очікуванням  $\bar{t}_b$  (відновлення „швидке”, тобто  $t_b \ll 1/n\lambda$ ). Тоді для показників надійності системи 1 справедливі формули:

$$T_0^{(1)} = \frac{1}{n\lambda}; \quad K_r^{(1)} = \frac{T_0^{(1)}}{T_0^{(1)} + \bar{t}_B} = [1 + n\lambda\bar{t}_B]^{-1}. \quad (1)$$

**Система 2** (з часовим резервуванням). Збережемо вихідні умови функціонування системи 1, але будемо вважати, що в ній передбачено використання поповнюваного резерву часу  $t_d$  [2]. Таку систему зручно представити у вигляді деякої умовної системи об'єкт-час, що складається з двох елементів: будь-якого зарезервованого об'єкту та резерву часу (рис. 1). Ця схема якісно аналогічна відомій схемі структурного ненавантаженого однократного резервування (дублювання) заміщенням: слід за відмовою об'єкту діє резерв часу. Відмова системи виникає в момент витрачання резерву часу.

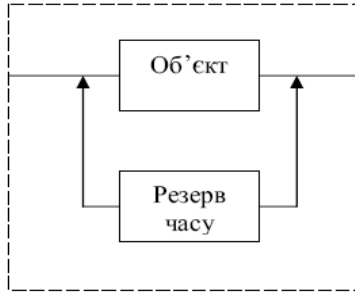


Рис. 1. Умовна система об'єкт-час

Для показників надійності такої системи отримані наступні розрахункові співвідношення [2,3]:

$$T_0^{(2)} = \frac{1}{n\lambda} + \frac{M[\min(t_B, t_d)]}{1 + F_B(t_d)}, \quad (2)$$

$$K_r^{(2)} = \frac{1 + n\lambda M[\min(t_B, t_d)]}{1 + n\lambda\bar{t}_B}, \quad (3)$$

де

$$M[\min(t_B, t_d)] = \int_0^{t_d} [1 - F_B(t)] dt. \quad (4)$$

**Система 3** (зі структурним резервуванням). Розглянемо систему зі структурним ковзним резервуванням, що складається з  $n$  основних ( $n \geq 1$ ) і  $m$  резервних ( $m \geq 1$ ) однотипних елементів, яка знаходиться у тому ж режимі, що і основні елементи (коефіцієнт електричного навантаження  $\alpha = 1$ ) (рис. 2). Сумарна інтенсивність відмов системи  $\lambda_i$  залежить від кількості непрацездатних елементів і визначається кількістю основних та резервних елементів, а також інтенсивністю відмов окремого основного та резервного елементів. Зокрема, для навантаженого структурного резерву

$$\lambda_i = (n + m - i)\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Ремонтний орган включає в себе  $l$  ремонтних бригад ( $l \geq 1$ ) з однаковим розподілом тривалості відновлення працездатності  $F_B(t)$ . Кожна бригада може одночасно ремонтувати тільки один елемент, що відмовив, і кожен елемент відновлюється лише однією з  $l$  бригад. Якщо всі бригади зайняті і відмовляє ще один елемент, то він стає в чергу на ремонт. Бригада, яка закінчила відновлення одного з елементів, бере на ремонт перший з тих що стоїть у черзі непрацездатних елементів (рис. 2). Будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості елементів, а в ремонтному органі реалізовано „швидко” відновлення ( $\bar{t}_B \ll \frac{1}{\lambda}$ ). Будемо вважати, що час підключення резервних елементів  $t_{II} = 0$ , а відмова системи виникає при відмові  $m + 1$  елементів.

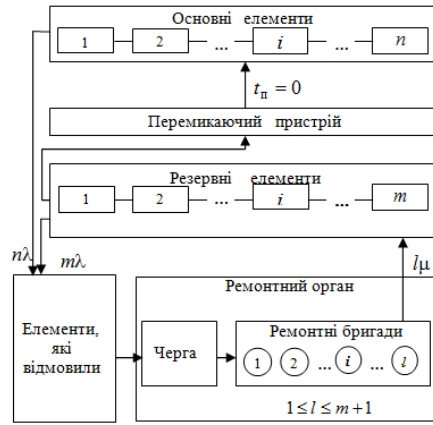


Рис. 2. Структурна схема системи зі структурним резервом

Перехід системи зі стану  $m+1$  в  $m$  будемо вважати відновленням її працездатності (нагадаємо, що стан системи визначається числом елементів, що відмовили). Сказане вище пояснюється рис. 3, де позначено:  $t_0$  – момент першої відмови системи;  $t_k$  – напрацювання системи між відмовами (час від  $k$ -го відновлення до  $(k+1)$ -ї відмови,  $k \geq 1$ );  $t_B^{(k)}$  – час від  $k$ -ї відмови системи до  $k$ -го відновлення.

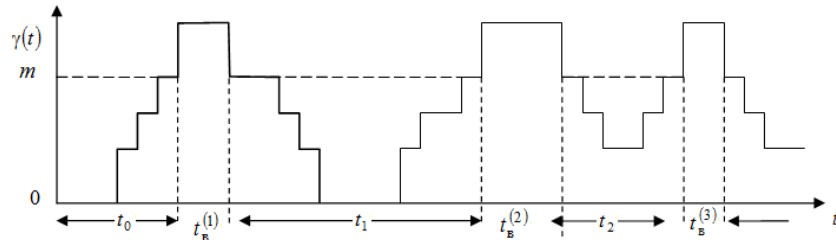


Рис. 3. Графічне зображення процесів зміни станів системи

Визначимо показники надійності системи 3 – середнє напрацювання на відмову  $T_0^{(3)}$  і коефіцієнт готовності  $K_r^{(3)}$ . Попередньо наведемо один результат, який стане у нагоді нам надалі [5]: якщо в даній моделі  $m$  і  $l$  – фіксовані, а  $F_B(t)$ ,  $\lambda_i$ ,  $i \geq 0$  змінюються так, що

$$\left(\frac{\bar{\lambda}}{\underline{\lambda}}\right)^m \frac{\bar{\lambda} \beta_{m+1}}{\beta_1^m} \rightarrow 0, \text{ де } \bar{\lambda} = \max_i \lambda_i, \underline{\lambda} = \min_i \lambda_i, \text{ то}$$

$$P\{\lambda_0 q_1 t_k > x\} \rightarrow e^{-x}$$

рівномірно за номером  $k$ , а

$$T_0^{(3)} = M[t_k] \approx \frac{1}{\lambda_0 q_1}, \tag{6}$$

де  $\beta_{m+1}$  –  $(m+1)$ -й початковий момент розподілу  $F_B(t)$ ;

$$q_1 = \prod_{i=1}^m \lambda_i \int_0^{\infty} \frac{x^{m-l}}{(m-l)!} \left[ \int_x^{\infty} (1-F_B(t)) dt \right] \frac{1-F_B(x)}{(l-1)!} dx, \tag{7}$$

а  $\lambda_i$  визначається формулою (5). Після підстановки виразу (7) у формулу (6) і ряду перетворень остаточно отримуємо

$$T_0^{(3)} = \frac{1}{n\lambda} \left[ \frac{x(\lambda \bar{t}_B)^m}{m!} \prod_{i=1}^m (n+i) \right]^{-1}, \tag{8}$$

де

$$x = \begin{cases} \beta_m & \text{при } l = 1, \\ \beta_1^m & \\ 1 & \text{при } l = m + 1. \end{cases} \quad (9)$$

Коефіцієнт готовності  $K_\Gamma^{(3)}$  виражається наближеною формулою [6]:

$$K_\Gamma \approx \frac{T_0^{(3)}}{T_0^{(3)} + T_B^{(3)}} \approx \left[ 1 + \frac{T_B^{(3)}}{T_0^{(3)}} \right]^{-1}, \quad (10)$$

де  $T_B^{(3)}$  – середній час відновлення працездатності системи 3, що визначається за формулою:

$$T_B^{(3)} = M[t_B^{(k)}] = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m} & \text{при } l = 1, \\ \frac{\beta_1}{m+1} & \text{при } l = m + 1. \end{cases} \quad (11)$$

Після підстановки виразу (11) в (10) отримуємо формулу для коефіцієнта готовності системи 3:

$$K_\Gamma^{(3)} \approx \left[ 1 + \frac{x(\lambda \bar{t}_B)^{m+1}}{(m+1)!} \prod_{i=0}^m (n+i) \right]^{-1}. \quad (12)$$

**Система 4** (зі структурним та навантажувальним резервуванням). Збережемо постановку попередньої задачі, але внесемо в неї одну зміну: будемо вважати, що елементи структурного резерву знаходяться в ненавантаженому режимі і практично не відмовляють ( $\alpha = 0$ ). Такий режим резервних елементів встановлюється з метою економії їх ресурсу і підвищення безвідмовності. У цьому випадку формула (5) для розрахунку  $\lambda_i$  приймає вид:

$$\lambda_i = n\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (13)$$

а середнє напрацювання на відмову і коефіцієнт готовності системи 4 виражаються формулами:

$$T_0^{(4)} = \frac{1}{n\lambda} \frac{m!}{x(n\lambda \bar{t}_B)^m}, \quad (14)$$

$$K_\Gamma^{(4)} = \left[ 1 + \frac{x(n\lambda \bar{t}_B)^{m+1}}{(m+1)!} \right]^{-1}, \quad (15)$$

де  $x$  визначається виразом (9).

**Система 5** (зі структурним, навантажувальним та часовим резервуванням). Збережемо постановку попередньої задачі, але будемо вважати, що в системі передбачено наповнювальний резерв часу  $t_d$ . Це означає, що час перебування системи 5 в стані  $m+1$  не повинно перевищувати допустиме значення  $t_d$ , в іншому випадку в моменти виконання нерівності

$$t_B^{(k)} > t_d, \quad k = 1, 2, \dots \quad (16)$$

виникає відмова (зрив функціонування) системи (рис. 3).

Для знаходження показників надійності  $T_0^{(5)}$  та  $K_\Gamma^{(5)}$  необхідно знайти ймовірність виконання нерівності (16). В роботі [5] показано, що якщо  $m$ ,  $l$  та  $F_B(x)$  – фіксовані, а  $\lambda_i = \theta_i$ , де  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,  $\varepsilon > 0$ ;  $0 < \theta' \leq \theta_i \leq \theta'' < \infty$  ( $\theta'$  та  $\theta''$  константи), і існує  $(m+1)$ -й момент розподілу  $F_B(x)$ , то

$$1 - F_B^*(x) = P\{t_B^{(k)} > x\} \rightarrow \frac{I(x)}{I(0)} \quad (17)$$

рівномірно за номером  $k$ , де

$$I(x) = \int_x^\infty \frac{(u-x)^{m-l}}{(m-l)!} \left[ \int_u^\infty 1 - F_B(t) \right]^{\ell-1} \frac{1 - F_B(u)}{(l-1)!} du. \quad (18)$$

Підставляючи в формулу (18) значення  $l=1$  (обмежене відновлення),  $l=m+1$  (необмежене відновлення) та  $x=0$ , після нескладних перетворень виразу (17) отримуємо

$$1 - F_B^*(x) = \frac{m}{\beta_m x} \int_x^\infty (u-x)^{m-1} [1 - F_B(u)] du \quad \text{при } l=1, \quad (19)$$

$$1 - F_B^*(x) = [1 - F_B(x)] \left[ \frac{1}{\bar{t}_B} \int_x^\infty (1 - F(u)) du \right]^m \quad \text{при } l=m+1, \quad (20)$$

де  $F_B^*(x)$  – функція розподілу часу відновлення системи 5. Позначимо через  $q_2$  ймовірність відмови системи 5, тобто ймовірність виконання нерівності (16):

$$q_2 = P\{t_B^{(k)} > t_d\} = 1 - F_B^*(t_d).$$

Тепер неважко визначити середнє напрацювання системи 5 на відмову:

$$T_0^{(5)} \approx \frac{T_0^{(4)}}{q_2}. \quad (21)$$

Підставляючи в (21) вираз (14) та (19), (20) при  $x=t_d$ , остаточно отримуємо:

$$T_0^{(5)} \approx \begin{cases} (m-1)! \left[ (n\lambda)^{m+1} \int_{t_d}^\infty (u-t_d)^{m-1} (1 - F_B(u)) du \right]^{-1} & \text{при } l=1, \\ m! \left[ (n\lambda)^{m+1} (1 - F_B(t_d)) \int_{t_d}^\infty (1 - F_B(u))^m du \right]^{-1} & \text{при } l=m+1. \end{cases} \quad (22)$$

Для розрахунку коефіцієнта готовності системи 5 може бути використана формула [2]:

$$K_\Gamma^{(5)} = \frac{T_0^{(4)} + M[\min(t_B^{(k)}, t_d)]}{T_0^{(4)} + T_B^{(5)}}, \quad (23)$$

де 
$$M[\min(t_B^{(k)}, t_d)] = \int_0^{t_d} [1 - F_B^*(x)] dx, \quad (24)$$

а  $T_0^{(4)}$ ,  $T_B^{(5)} = T_B^{(3)}$  і  $1 - F_B^*(x)$  визначаються виразами відповідно (14), (11), (19) та (20).

Таким чином, для всіх систем, які розглядаються, отримані в загальному вигляді розрахункові співвідношення для середнього напрацювання на відмову  $T_0^{(i)}$  та коефіцієнта готовності  $K_\Gamma^{(i)}$ ,  $i = \overline{1,5}$  (формули 1–4, 8, 12, 14, 15, 22–24). Ці формули помітно спрощуються при експоненційному розподілу часу відновлення з параметром  $\mu = 1/\bar{t}_B$ . Зокрема, у цьому випадку для системи 5 отримуємо:

$$T_0^{(5)} = \begin{cases} \frac{1}{n\lambda} \frac{e^{\mu t_d}}{(n\lambda \bar{t}_B)^m} & \text{при } l=1, \\ \frac{1}{n\lambda} \frac{m! e^{(m+1)\mu t_d}}{(n\lambda \bar{t}_B)^m} & \text{при } l=m+1, \end{cases} \quad (25)$$

а коефіцієнт готовності  $K_r^{(5)}$  визначається формулою (23), в якій

$$T_B^{(5)} = \begin{cases} \bar{t}_B & \text{при } l = 1, \\ \frac{\bar{t}_B}{m+1} & \text{при } l = m+1, \end{cases} \quad (26)$$

$$M[\min(t_B^{(k)}, t_d)] = \begin{cases} \frac{1}{\mu} (1 - e^{-\mu t_d}) & \text{при } l = 1, \\ \frac{1}{(m+1)\mu} (1 - e^{-(m+1)\mu t_d}) & \text{при } l = m+1. \end{cases} \quad (27)$$

### Оцінка виграшу в надійності при використанні надлишковості

При проведенні такої оцінки доцільно від показника надійності системи  $K_r$  перейти до показника  $K_n = 1 - K_r$  – коефіцієнта простою [1,4]. Для кількісної оцінки виграшу від введення надлишковості за показниками надійності  $T_0$  та  $K_n = 1 - K_r$  будемо використовувати коефіцієнти  $Q_{T_0}$  і  $Q_{K_n}$ , які визначаються співвідношеннями:

$$Q_{T_0}^{(i)} = \frac{T_0^{(i)}}{T_0^{(1)}}, \quad i = \overline{2,5}, \quad (28)$$

$$Q_{K_n}^{(i)} = \frac{K_n^{(1)}}{K_n^{(i)}}, \quad i = \overline{2,5}, \quad (29)$$

де  $T_0^{(i)}$ ,  $K_n^{(i)}$  – середнє напрацювання на відмову і коефіцієнт простою  $i$ -ї системи з надлишковістю,  $i = \overline{2,5}$ ;  $T_0^{(1)}$ ,  $K_n^{(1)}$  – показники надійності системи без надлишковості. При проведенні розрахунків за допомогою виразів (28) та (29) необхідно використовувати отримані вище формули для показників надійності  $T_0^{(i)}$  і  $K_n^{(i)} = 1 - K_r^{(i)}$  систем, що розглядаються,  $i = \overline{1,5}$ . Виконаємо розрахунки коефіцієнтів  $Q_{T_0}^{(i)}$  і  $Q_{K_n}^{(i)}$  для наступних вихідних даних:  $n = m = 1$  (дубльована система);  $F_B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ ;  $l = 2$  (необмежене відновлення);  $\lambda = 0,01$  1/год;  $t_d = 2$  год;  $\lambda t_d = 0,02$ .

Розрахункові співвідношення для цих вихідних даних наведені в табл. 1, результати розрахунків зведені в табл. 2, і представлені у вигляді графіків на рис. 4.

Таблиця 1

### Формули для розрахунку коефіцієнтів $Q_{T_0}^{(i)}$ та $Q_{K_n}^{(i)}$ , $i = \overline{2,5}$

Система $i$	Формули для $Q_{T_0}^{(i)}$	Формули для $Q_{K_n}^{(i)}$
2	$\exp\left(\frac{\lambda t_d}{\lambda \bar{t}_B}\right) + \lambda \bar{t}_B \left( \exp\left(\frac{\lambda t_d}{\lambda \bar{t}_B}\right) - 1 \right)$	$\exp\left(\frac{\lambda t_d}{\lambda \bar{t}_B}\right)$
3	$\frac{1}{2\lambda \bar{t}_B}$	$\frac{1 + (\lambda \bar{t}_B)^2}{\lambda \bar{t}_B (1 + \lambda \bar{t}_B)}$
4	$\frac{1}{\lambda \bar{t}_B}$	$\frac{1 + 0,5(\lambda \bar{t}_B)^2}{0,5\lambda \bar{t}_B (1 + \lambda \bar{t}_B)}$
5	$\frac{1}{\lambda \bar{t}_B} \exp(2\lambda t_d / \lambda \bar{t}_B)$	$\frac{[1 + 0,5(\lambda \bar{t}_B)^2 \exp(2\lambda t_d / \lambda \bar{t}_B)]}{0,5\lambda \bar{t}_B (1 + \lambda \bar{t}_B)}$



Результати розрахунку значень  $Q_{T_0}^{(i)}$ ,  $Q_{K_n}^{(i)}$ ,  $i = \overline{2,5}$ 

Значення $\lambda \bar{t}_в$	Номер системи $i$				Номер системи $i$			
	2	3	4	5	2	3	4	5
	Значення $Q_{T_0}^{(i)} = \lambda T_0^{(i)}$ , $i = \overline{2,5}$				Значення $Q_{K_n}^{(i)} = \frac{K_n^1}{K_n^{(i)}}$ , $i = \overline{2,5}$			
0,01	2,78	50	100	739	2,72	99	198	1463
0,02	1,69	25	50	135	1,65	49	98	266
0,03	1,43	16,6	33,3	64	1,4	32,4	64	123
0,04	1,32	12,5	25	41	1,29	24	48	79
0,05	1,24	10	20	30	1,22	19,2	38	57
0,06	1,2	8,3	16,6	23	1,18	15,7	31,4	43

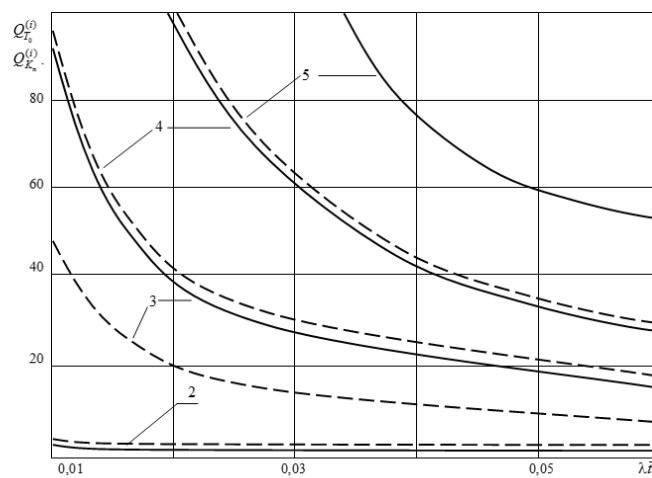


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнтів вирашу в надійності  $Q_{T_0}^{(i)}$  (штрихові криві) та  $Q_{K_n}^{(i)}$  (суцільні криві) для систем з різними видами надлишковості від значення  $\lambda \bar{t}_в$  при  $\lambda = \text{const}$ ; 2 – система з часовим резервуванням; 3 – система зі структурним резервуванням; 4 – система зі структурним та навантажувальним резервуванням; 5 – система зі структурним, навантажувальним і часовим резервуванням

**Висновки.** Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Результати розрахунків (табл. 2) і графіки рис. 4 ілюструють важливу особливість, яка відноситься до величини вирашу в надійності при комплексному використанні надлишковості. Так, вираш у безвідмовності та готовності системи з комбінованим резервом (структурним, навантажувальним та часовим резервуванням, криві 5 на рис. 4) при зменшенні середнього часу відновлення  $\bar{t}_в$  (при  $\lambda = \text{const}$ ) не пропорційний частковим вирашам при окремих видах резервування (криві 2 і 4), а помітно вище.

Це можна пояснити тим, що спільне використання різних видів надлишковості дає можливість частково компенсувати недоліки, притаманні окремим її видам, і посилити їх переваги.

2. Для резервування системи 1 зменшення часу відновлення  $\bar{t}_в$  призводить лише до збільшення коефіцієнта готовності  $K_r^{(1)}$  та не впливає на показник безвідмовності  $T_0^{(1)}$  (формули (1)). При наявності будь-якого виду резервування скорочення часу відновлення стає ефективним методом підвищення не тільки готовності системи, а й інших показників надійності, зокрема, показника безвідмовності  $T_0$  (см.табл. 2 і рис. 4). Так, при зменшенні

$\lambda_{\bar{b}}$  з 0,05 до 0,03 (це відповідає скороченню середнього часу відновлення  $\bar{t}_b$  з 5 год. до 3 год. при  $\lambda = \text{const}$ ) коефіцієнти виграшу в надійності за показниками середнього напрацювання на відмову  $Q_{T_0}^{(4)}$  та коефіцієнта простою  $Q_{K_n}^{(4)}$  системи 4 збільшуються приблизно в 1,67 рази, а системи 5 – приблизно в 2,1 рази.

3. При часовому резервуванні (система 2) виграш в надійності  $Q_{T_0}^{(2)}$  та  $Q_{K_n}^{(2)}$  визначається в основному значеннями  $\mu_{\bar{d}}$ , тобто співвідношенням між середнім часом відновлення  $\bar{t}_b = \frac{1}{\mu}$  і величиною резерву часу  $t_d$ . При цьому виграш за коефіцієнтом простою  $Q_{K_n}^{(2)}$  близький  $Q_{T_0}^{(2)}$  та завжди менше цієї величини (см. формули для  $Q_{T_0}^{(2)}$  і  $Q_{K_n}^{(2)}$  в табл. 1).

4. Зменшення електричного навантаження на резервні елементи в системі 3 (структурне та навантажувальне резервування) дозволяє помітно поліпшити показники надійності системи у порівнянні з показниками надійності системи 3 (структурне резервування). Так, при зміні  $\lambda_{\bar{b}}$  від 0,01 до 0,06 відношення коефіцієнтів виграшу за показниками  $T_0$  і  $K_n$  для

системи 4 до аналогічних показників системи 3  $\left( \frac{Q_{T_0}^{(4)}}{Q_{T_0}^{(3)}}, \frac{Q_{K_n}^{(4)}}{Q_{K_n}^{(3)}} \right)$  дорівнює приблизно двом,

тобто для прийнятих вихідних умов виграш в надійності при коефіцієнті навантаженості резервних елементів  $\alpha = 0$  (система 4) в два рази більше, ніж при  $\alpha = 1$  (система 3). Це свідчить про доцільність утримання резервних елементів в ненавантаженому ( $\alpha = 0$ ) або полегшеному ( $0 < \alpha < 1$ ) режимах, якщо є можливість переведення резервних елементів в робочий (основний) режим та підключення замість елементів, які відмовили, за допустимий час (без порушення функціонування системи).

Напрямок подальших досліджень є дослідження надійності об'єктів телекомунікаційних систем і мереж загального та спеціального призначення з комплексним використанням надлишковості та з урахуванням не тільки стійких відмов, а також збоїв обладнання, оскільки збої грають суттєву роль у порушенні нормального функціонування мереж зв'язку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. – К.: Держстандарт України, 1994. – 160 с.
2. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: Монографія / [Креденцер Б.П., Буточнов О.М., Міночкін А.І., Могилевич Д.І.] – К.: „Фенікс”, 2013. – 342 с.
3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Черкесов Г.Н. – СПб: Питер, 2005. – 479 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. совет: В.С. (предс.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. Т. 5: Проектный анализ надежности / под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. – 316 с.
5. Вопросы математической теории надежности / [Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К., Каштанов В.А. и др.]; под ред. Б.В.Гнеденко. – М.: Сов. радио, 1983. – 376 с.
6. Креденцер Б.П. Оценка эксплуатационно-технических характеристик объектов телекоммуникаций при априорной неопределённости / Креденцер Б.П., Миночкин А.И., Могилевич Д.И. / Под научной ред. Б.П. Креденцера. – К.: „Фенікс”, 2012. – 336 с.