

Могилевич Д.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кононова І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Щиголь Ю.Ф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ВІДМОВ І ЗБОЇВ

На ефективність функціонування електронної комунікаційної мережі суттєво впливає надійність підсистем та елементів, що її складають, а також складність зв'язків між ними. Незважаючи на постійне удосконалення технологій виробництва високонадійних елементів, вузлів та блоків, а також методів їх збірки на рівні систем та комплексів, зростання складності сучасних та перспективних систем не завжди дозволяє забезпечити необхідну надійність їх функціонування.

Метою даного дослідження є побудова моделі надійності об'єктів (комунікаційного обладнання) електронної комунікаційної мережі, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкту, характеристиками надійності елементів його структури і параметрами процесу функціонування об'єкту та враховує не тільки стійкі відмови, а також і збої обладнання.

Розглянуто питання оцінки надійності телекомунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі з урахуванням збоїв. Запропоновано використовувати для опису процесів зміни станів досліджуваної системи регенеруючий процес. Отримано розрахункові співвідношення для основних показників надійності: ймовірність безвідмовного функціонування, середнього напрацювання до відмови та коефіцієнта готовності.

Наведено приклад розрахунку впливу збоїв на показники безвідмовності системи зі структурним і часовим резервуванням. Визначено, що при певних умовах виникаючі збої можуть суттєво погіршити показники надійності функціонування комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі навіть при наявності структурного резерву.

Ключові слова: моделі надійності, стійкі відмови, збої, безвідмовність системи, структурне резервування

Постановка проблеми. Слід відмітити, що до теперішнього часу у більшості фахівців в області дослідження електронної комунікаційної мережі сформувалася думка про недоцільність проведення наукових досліджень і застосування практичних заходів, пов'язаних з кількісною оцінкою та забезпеченням надійності цього класу технічно складних систем. Зневага питанням надійності нерідко обґрунтовується тим, що сучасні засоби зв'язку є досить надійними, а електронної комунікаційної мережі – розгалуженими та такими, які допускають обходи. З цим можна частково погодитись, однак кожен етап розвитку техніки ставить на порядок денний нові задачі, які вимагають свого розв'язку. Це повною мірою

відноситься і до забезпечення надійності мереж зв'язку.

Не звертаючи увагу на те, що сучасне активне мережеве обладнання відноситься до високонадійних елементів, відмови в електронній комунікаційній мережі відбуваються доволі часто.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз робіт [1, с. 445–447; 2, с. 111; 3, с. 271; 4, с. 2–3] показав, що ознаки відмов в електронних комунікаційних мережах можна класифікувати за наступними перехресними групами: 45%...70% – природне старіння елементів апаратного забезпечення маршрутизаторів (в першу чергу зношення інтерфейсних плат) [2, с. 112]; 20% – некоректні операції технічного

обслуговування [2, с. 123]; 17% – збої у програмному забезпеченні маршрутизаторів [3, с. 273]; 16% – збої у електроживленні [3, с. 272]; щодо транспортних мереж – 84% відмов в них обумовлено збоями оптичного обладнання [4, с. 5]. Кожна відмова (збій) у електронній комунікаційній мережі веде до припинення інформаційного обміну на десятки секунд. З урахуванням високих швидкостей передачі, це викликає втрати гігабіт даних та суттєво знижує готовність мережі.

У більшості моделей надійності телекомунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі, які розроблено до теперішнього часу, враховано тільки стійки відмови [5, с. 4–5; 6, с. 84–85; 7, с. 203–207; 8, с. 257–259]. Під моделлю надійності розуміють математичну модель, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкту, характеристиками надійності елементів його структури та параметрами процесу функціонування об'єкту [9, с. 102].

Формулювання цілей статті. Метою статті є побудова моделі надійності об'єктів (комунікаційне обладнання) електронної комунікаційної мережі, яка враховує не тільки стійки відмови, а також і збої обладнання.

Під збоєм будемо розуміти самоусуваючу відмову, або однократну відмову, яка усувається незначним втручанням оператора [10, с. 24]. Відмінною ознакою збою є те, що працездатний стан об'єкту може бути забезпечено без ремонту, наприклад, шляхом впливу оператора на органи керування. Характерним прикладом збою є «зависання» телекомунікаційного обладнання (маршрутизатора, модему, тощо), або ПЕОМ, що усувається повторним перезапуском програми. Пошкодження збійного характеру не впливають на працездатність телекомунікаційного обладнання, але при наявності резервного обладнання стимулюють його перехід в основний режим. Оскільки цей перехід здійснюється успішно з ймовірністю відмінною від одиниці, то зі зростанням інтенсивності збоїв зростає частка відмов (зривів функціонування) телекомунікаційного обладнання, які виникають при підключенні резервного обладнання.

Тому, для отримання більш достовірних результатів при оцінці надійності функціонування комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі необхідно враховувати не тільки відмови, а також і їх збої.

Виклад основного матеріалу. Постановка задачі. Нехай є електронна комунікаційна мережа, яка складається з напрямів зв'язку. Під напрямом

зв'язку розуміємо сукупність шляхів встановлення з'єднань між двома комутаційними центрами. Будемо вважати, що шляхи (системи) в кожному напрямку незалежні. Розглянемо систему (шлях), що складається в загальному випадку з n основних ($n \geq 1$) та m резервних ($m \geq 1$) елементів (для спрощення міркувань будемо вважати, що всі елементи в системі ідентичні), які можуть відмовляти та відновлюватись. Позначимо через λ_i сумарну інтенсивність відмов елементів у деякий момент часу за умови, що в цей момент непрацездатні i елементів. Значення λ_i визначається числом основних та резервних елементів, тобто

$$\lambda_i = [n + (m - i)\alpha] \lambda, \quad i = \overline{0, m}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт навантаження резервного елемента ($0 \leq \alpha \leq 1$). З формули (1) випливає, що у випадках ненавантаженого ($\alpha = 0$) структурного резерву $\lambda_i = n\lambda$, $i = \overline{0, m}$; навантаженого ($\alpha = 1$) резерву $\lambda_i = (n + m - i)\lambda$, $i = \overline{0, m}$; полегшеного ($0 < \alpha < 1$) резерву $\lambda_i = [n + (m - i)\alpha]\lambda$, $i = \overline{0, m}$.

Будемо вважати, що обладнання основних елементів є джерелом не тільки стійких відмов, але й збоїв з інтенсивністю λ_z . В момент виникнення відмови або збою при наявності резервного елемента починається його підключення.

Ремонтний орган включає l ремонтних бригад ($l \geq 1$). Час відновлення працездатності одного елемента розподілено за довільним законом $F_b(t)$ з кінцевим математичним очікуванням (МОЧ) \bar{t}_b . Кожна бригада може одночасно ремонтувати тільки один елемент, і кожний елемент відновлюється лише однією з бригад. Якщо всі бригади зайняті та відмовляє ще один елемент, то він стає в чергу на ремонт. Бригада, яка закінчила відновлення одного з елементів, бере в ремонт перший зі стоячих у черзі елементів. Будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості елемента. Нехай час підключення t_n резервного елемента взамін основного, що відмовив – випадкова величина (ВВ) з довільною функцією розподілу (ФР) $F_n(t)$ та кінцевим МОЧ \bar{t}_n , а допустимий час підключення, що визначає використовуваний в системі поповнюваний резерв часу, $t_d = \text{const}$.

Приймемо наступні допущення: при відмові $(m + 1)$ -го елемента система вимикається та нові відмови не виникають, система відновлює свою роботу в момент закінчення ремонту одного з $m + 1$ елементів; тривалість ремонту набагато менше середнього напрацювання елемента між відмовами ($\bar{t}_b \ll 1/\lambda$) (випадок „швидкого відновлення”); тривалість підключення і величина резерву часу значно менше середнього напрацювання між відмовами та збоями обладнання ($\bar{t}_n \ll 1/\lambda_i$; $t_d \ll 1/\lambda_i$,

$i = \overline{0, m}$; $\bar{t}_n \ll 1/\lambda_3$; $\bar{t}_d \ll 1/\lambda_3$) і середньої тривалості ремонту ($\bar{t}_n \ll \bar{t}_B$; $\bar{t}_d \ll \bar{t}_B$); якщо підключення резервного елемента взамін основного, що відмовив відбувається за причини виникнення збою, то після підключення цей факт практично миттєво встановлюється системою контролю і елемент поміщується в резерв.

Прийняті допущення дозволяють знехтувати затримкою системи в області працездатних станів на час (t_n, t_d) при відмовах або збоях основних елементів та вважати, що після відмови $(m + 1)$ -го елемента не один з $m + 1$ елементів не встигне відновитися та підключиться в роботу за допустимий час t_d з ймовірністю одиниця.

Відмова системи (зрив функціонування) може виникнути у двох випадках: в момент перевищення часу підключення допустимої величини ($t_n > t_d$) або в момент відмови $(m + 1)$ -го елемента. Необхідно побудувати моделі надійності системи, тобто отримати для прийнятих вихідних умов розрахункові співвідношення для основних показників надійності: ймовірність безвідмовного функціонування $P(t, t_d)$, середнього напрацювання до відмови $T_0(t_d)$ та коефіцієнта готовності $K_T(t_d)$.

Основні результати. Нехай в початковий момент часу всі елементи працездатні. Позначимо через $\gamma(t)$ стан системи в момент $t > 0$, обумовлене кількістю непрацездатних елементів. Нескладно бачити, що процес зміни станів системи може бути описано регенеруючим процесом, точки регенерації якого – це моменти потрапляння процесу $\gamma(t)$ в 0 (моменти завершення ремонту всіх елементів, що відмовили). Період регенерації складається з двох частин: $\xi = \xi_1 + \xi_2$, де ξ_1 – період, протягом якого всі елементи працездатні; ξ_2 – період, на якому виникає відмова або збій хоча б одного елемента. У відповідності з прийнятими вихідними умовами $P\{\xi_1 < t\} = 1 - \exp[-(\lambda_0 + \lambda_3)t]$. Позначимо через $x(t)$ число тривалих підключень ($t_n > t_d$) від останньої точки регенерації до моменту t . Введемо далі в розгляд двомірний процес $\zeta(t) = \{y(t), x(t)\}$, який також буде регенеруючим процесом, причому період його регенерації співпадає з періодом регенерації процесу $\gamma(t)$. Відмова системи може виникнути тільки на другій частині періоду регенерації ξ_2 в момент, коли перша компонента $\gamma(t)$ переходить з m в $m + 1$ або друга компонента $x(t)$ переходить з 0 в 1. Позначимо ймовірність цієї події через q_0 .

У відповідності з результатами робіт [5, с. 5; 6, с. 85] в нашому випадку можна записати асимптотичну формулу для розподілу часу T_0 до першої відмови досліджуваної системи:

$$\lim_{(\lambda_0 + \lambda_3)\bar{t}_n \rightarrow 0} P\{(\lambda_0 + \lambda_3)q_0T_0 > x\} = e^{-x},$$

яка означає, що при „швидкому” відновленні працездатності елементів для ймовірності безвідмовного функціонування і середньому напрацюванні до відмови системи справедливі прості наближені вирази:

$$P(t, t_d) \approx \exp[-(\lambda_0 + \lambda_3)q_0t], \quad (2)$$

$$T_0(t_d) \approx 1/(\lambda_0 + \lambda_3)q_0, \quad (3)$$

де λ_0 визначається з формули (1) при $i = 0$.

Наразі задача звелась до асимптотичної оцінки ймовірності q_0 , розв'язок якої викладено нижче. Нехай подія A є відмовою $m + 1$ елементів на одному періоді регенерації, а B – поява довготривалого підключення $t_n > t_d$ на тому ж періоді. Позначимо через $P\{A\}$ та $P\{B\}$ ймовірності відповідних подій. Тоді з урахуванням незалежності цих подій шукана ймовірність q_0 визначається формулою:

$$q_0 = P\{A \cup B\} = P\{A\} + P\{B\bar{A}\}. \quad (4)$$

Перший доданок у формулі (4) оцінено в роботі [8, с. 251], де показано, що якщо λ_k та m фіксовані і $\beta_{m+1}/\beta_1^m \rightarrow 0$, де $\beta_{m+1} = \int_0^\infty x^{m+1} dF_B(x)$, то

$$P\{A\} \approx \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m \int_0^\infty \frac{x^{m-1}}{(m-1)!} [F_B^*(x)]^{l-1} \frac{1 - F_B(x)}{(l-1)!} dx, \quad (5)$$

$$\text{де } F_B^*(x) = \int_x^\infty [1 - F_B(t)] dt.$$

Проведемо оцінку другого доданку у виразі (4). Нехай подія B_0 означає появу тривалого підключення $t_n > t_d$ на початку другої частини ξ_2 періоду регенерації, а B_1 – поява такого підключення всередині періоду ξ_2 (тобто не при першому, а при наступних відмовах та збоїв основних елементів протягом часу ξ_2). Зрозуміло, що на одному періоді регенерації може виникнути подія B_0 або B_1 (в силу прийнятих вихідних умов сумісна їх поява неможлива). Враховуючи це, запишемо вираз для другого доданку у формулі (4) в наступному виді:

$$P\{B\bar{A}\} = P\{B_0\bar{A}\} + P\{B_1\bar{A}\} = P\{B_0\}[1 - P\{A\}] + \theta P\{B_1\}, \quad (6)$$

де θ – довільне число, яке приймає значення в інтервалі $(0, 1)$; $P\{B_0\} = q(n\lambda + \lambda_3)/(\lambda_0 + \lambda_3)$ – ймовірність появи довготривалого підключення на початку другої частини ξ_2 періоду регенерації ξ причому

$$q = P\{t_n > t_d\} = 1 - F_n(t_d). \quad (7)$$

Оскільки при «швидкому» відновленні працездатності ймовірність відмови $m + 1$ елементів на одному періоді регенерації – величина дуже мала ($P\{A\} \rightarrow 0$), то

$$P\{B\bar{A}\} = q(n\lambda + \lambda_3)/(\lambda_0 + \lambda_3) + \theta P\{B_1\}, \quad 0 < \theta < 1, \quad (8)$$

і нам залишається оцінити тільки ймовірність $P\{B_1\}$. Зауважимо λ_k на $\lambda^* = \max_{0 \leq k \leq m} \lambda_k$ і l на 1, цим ми тільки збільшимо ймовірність $P\{B_1\}$. Позначимо після такої заміни відповідну подію через B_1^* , а її ймовірність через $P\{B_1^*\}$. Представимо розглядаємий процес функціонування системи, як про-

цес обслуговування потоку, що надходить (елементів, що відмовили та збоїв) з інтенсивністю $(\lambda^* + \lambda_3)$ в системі типу $M / G / 1$. Нехай v – число вимог, що прийшли на періоді ξ_2 зайнятості в цій системі. Тоді для ймовірності $P\{B_1^*\}$ можна записати наступний вираз:

$$P\{B_1^*\} = (1-q) \sum_{k=1}^{\infty} P\{v=k\} [1 - (1-q)^{k-1}] \leq (1-q) \sum_{k=1}^{\infty} (k-1) q P\{v=k\} \leq q(Mv-1), \quad (9)$$

де Mv – МОЧ ВВ v , що визначається відомою формулою:

$$Mv = 1 / [1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b]. \quad (10)$$

Підставляючи вирази (10) в (9), отримуємо:

$$P\{B_1^*\} \leq \frac{(\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b q}{1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b}.$$

Звідси випливає, що оскільки $(\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b q / [1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b] \rightarrow 0$ при $\bar{t}_b \rightarrow 0$, то $P\{B_1^*\} \rightarrow 0$ і

$$P\{BA\} \approx q(n\lambda + \lambda_3) / (\lambda_0 + \lambda_3). \quad (11)$$

Отже, остаточно з урахуванням виразів (5) та (11) можна записати наступну формулу для ймовірності q_0 , що входить у (2) та (3):

$$q_0 = \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \int_0^{\infty} \frac{x^{m-i}}{(m-i)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{i-1} \frac{1 - F_b(x)}{(i-1)!} dx. \quad (12)$$

В часткових випадках при обмеженому ($l=1$) та необмеженому ($l=m+1$) відновленнях загальна формула (12) спрощується:

$$q_0 = \begin{cases} \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \frac{\beta_m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l=1, \\ \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \frac{\beta_1^m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l=m+1, \end{cases} \quad (13)$$

де $\beta_m = \int_0^{\infty} x^m dF_b(x)$.

З формули (13) можна зробити важливий для практики висновок: при необмеженому відновленні ($l=m+1$) показники надійності системи, що розглядається не залежать від виду ФР $F_b(t)$ часу відновлення працездатності елементів, а залежать тільки від МОЧ ВВ t_b .

Отримані вирази (12) та (13) справедливі за умови [7, с. 209-213]:

$$\rho C \beta_{m+1} / \beta_1^{m+1} \ll 1, \quad (14)$$

де C – коефіцієнт, величина якого визначається кількістю основних та резервних елементів, а також ступенем навантаженості резерву, а $\rho = \lambda \bar{t}_b$.

Таким чином, підставляючи у вирази (2) та (3) формули (13) з урахуванням (1), після нескладних перетворень остаточно отримаємо:

$$P_0(t, t_d) \approx \exp(-t/T_0(t_d)), \quad (15)$$

$$T_0(t_d) \approx \frac{1}{\lambda(n + m\alpha + k_3)} \left[\frac{q(n + k_3)}{n + m\alpha + k_3} + \frac{x \rho^m}{m!} \prod_{i=0}^{m-1} (n + i\alpha) \right]^{-1}, \quad (16)$$

де $k_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda}$; $x = \begin{cases} 1, & l = m+1, \\ \beta_m / \beta_1^m, & l = 1. \end{cases}$

При $\lambda = 1$ або $\lambda = 0$ з формули (16) отримуємо розрахункові співвідношення для випадків навантаженого або ненавантаженого структурного резерву.

Коефіцієнт готовності системи визначається формулою:

$$K_r = \frac{T_0(t_d)}{T_0(t_d) + T_b}, \quad (17)$$

де T_b – середній час відновлення системи.

Розглянемо випадок, коли середній час підключення \bar{t}_n резервного елемента значно менше середнього часу відновлення \bar{t}_b одного елемента, тобто $\bar{t}_n \ll \bar{t}_b$. У цьому випадку часом підключення \bar{t}_n можна знехтувати і для розрахунку середнього часу відновлення системи T_b може бути використана формула [7, с. 214]:

$$T_b = \frac{A(m+1, l)}{A(m, l)}, \quad (18)$$

де

$$A(m+1, l) = \int_0^{\infty} \frac{x^{m+1-l}}{(m+1-l)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{l-1} \frac{1 - F_b(x)}{(l-1)!} dx, \quad (19)$$

$$A(m, l) = \int_0^{\infty} \frac{x^{m-l}}{(m-l)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{l-1} \frac{1 - F_b(x)}{(l-1)!} dx. \quad (20)$$

У випадках повністю обмеженого ($l=1$) або необмеженого ($l=m+1$) відновлення формули (19) та (20) спрощуються:

$$A(m+1, l) = \begin{cases} \beta_{m+1} / (m+1)! & \text{при } l=1, \\ \beta_1^{m+1} / (m+1)! & \text{при } l=m+1, \end{cases} \quad (21)$$

$$A(m, l) = \begin{cases} \beta_m & \text{при } l=1, \\ m! & \text{при } l=m+1, \end{cases} \quad (22)$$

і вираз для \bar{T}_b приймає вигляд:

$$\bar{T}_b = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m} & \text{при } l=1, \\ \frac{\beta_1}{m} + 1 & \text{при } l=m+1. \end{cases} \quad (23)$$

При проведенні розрахунків за формулою (23) можна використовувати вирази для β_m , $m \geq 1$, з табл. 1, де через $\Phi(x)$ позначена функція Лапласа.

Таким чином, розрахунок коефіцієнта готовності системи слід проводити за формулою (17) з використанням виразів (16) та (23).

Оцінка похибки наближених формул. Як впливає з нерівності (14), похибка наближених формул (15) і (16) при фіксованих значеннях m і C визначається в основному величиною малого параметру $\rho = \lambda \bar{t}_b$. На рис. 1 наведено графіки, що характеризують залежність відносної похибки δ формули (16) від значень малого параметру $\rho = \lambda \bar{t}_b$, m і $q = P\{t_n > t_d\}$. Розрахунки проводились для випадку $\lambda = 10^{-2}$ 1/год.; $n = \alpha = l = 1$; $\lambda_3 = 0$.

Аналіз графіків дозволяє зробити наступні висновки:

Формули для m -го начального моменту функції розподілу $F_B(t)$

Види функцій розподілу $F_B(t)$	Формула для $\beta_m, m \geq 1$
Експоненціальний	$\frac{m!}{\mu^m} = \frac{1}{\mu^m} \prod_{i=1}^m i$
Усічений нормальний	$\sum_{i=0}^m \binom{m}{i} \bar{t}_B^i \sigma_B^{m-i} I_{m-i}, I_0 = \sqrt{2\pi} \left[0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{t}_B}{\sigma_B}\right) \right], I_1 = \exp\left(-\frac{\bar{t}_B^2}{2\sigma_B^2}\right),$ $I_k = \left(-\bar{t}_B/\sigma_B\right)^{k-1} I_1 + (k-1)I_{k-2}, k \geq 2$
Релея	$\beta_1 = \bar{t}_B = \sqrt{(\pi/2)}\sigma_B; \beta_2 = 2\sigma_B^2; \beta_m = m\sigma_B^2 \beta_{m-2}, m > 2$
Ерланга k -го порядку	$\frac{(k+m-1)!}{(k-1)!\mu^m} = \frac{1}{\mu^m} \prod_{i=0}^{m-1} (k+i)$

наближена формула (16) володіє достатньо високою точністю (відносна похибка складає одиниці відсотків і менше) при значеннях малого параметру $\rho \leq 0,01$, що представляє найбільший практичний інтерес;

зменшення часу відновлення елементів дозволяє покращити показники надійності системи та підвищити точність наближених формул;

зі збільшенням резерву часу t_d (зменшуємо ймовірність q) відносна похибка δ зростає. Це можна пояснити зменшенням частки відмов системи за рахунок тривалого підключення ($t_n > t_d$), що дають експоненціальні складові часу $T_0(t_d)$ в загальному потоці відмов системи;

при зростанні числа резервних елементів m похибка зменшується.

Приклад розрахунку. Розглянемо вплив збоїв на показники безвідмовності класу систем, що розглядаються.

В табл. 2 наведено результати розрахунків за формулою (16) середнього напрацювання до відмови системи зі структурним і часовим резервуванням при різних значеннях інтенсивності збоїв, кількості резервних елементів та ймовірності q відмови системи при переключенні. Система містить один основний елемент ($n=1$), навантажений резерв ($\alpha=1$), $\rho=\lambda=0,001/\text{год.}$, відновлення обмежене ($l=1$). З табл. 2 видно, що збої значно вплива-

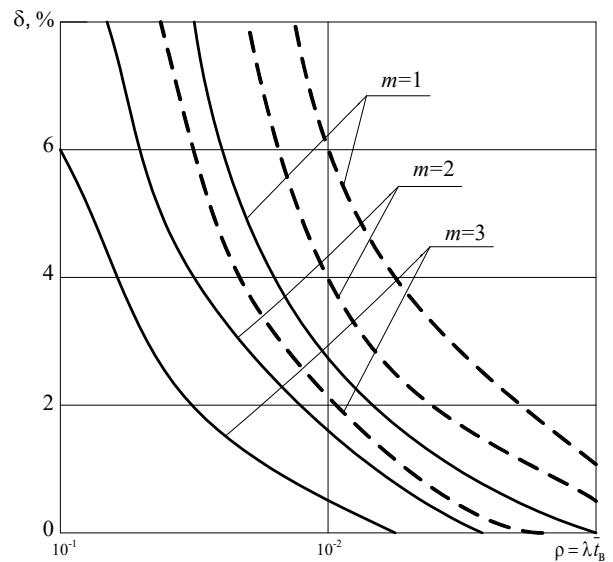


Рис. 1. Графіки залежності відносної похибки формули (16) від величини малого параметру ρ при різних значеннях m : — $q = 0,01$, - - - $q = 0$

ють на безвідмовність системи. Так, при $K_3=10$ та $q=0,05$ збільшення кількості резервних елементів до двох призводять до незначного (всього на 4%) збільшення середнього напрацювання до відмови, а використання третього резервного елемента зовсім не дає збільшення показника. Це пояснюється більш частим підключенням резервних

Таблиця 2

Значення середнього напрацювання до відмови системи $T_0(t_d)$

$K_3 = \lambda_3/\lambda$	Ймовірність $q=0,005$			Ймовірність $q=0,025$			Ймовірність $q=0,05$		
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
0	4000	18868	19984	2222	3953	3999	1429	1988	2000
5	2000	3300	3333	588	665	667	313	333	333
10	1333	1808	1818	339	363	364	175	182	182
20	800	950	952	183	190	190	93	95	95

елементів при збільшенні інтенсивності збоїв та збільшенням при цьому кількості відмов системи при $t_{\Pi} > t_{\text{д}}$. Можливо навіть виникнення парадоксальної ситуації (в нашому випадку при $K_3=20$ та $q=0,05$), коли застосування структурного резервування призводить до зменшення середнього напрацювання до відмови системи порівняно з середнім напрацюванням до відмови одного елемента (в нашому випадку $1/\lambda=100$ год.), що знаходиться в основному режимі роботи.

Висновки. Таким чином отримано аналітичні вирази для основних показників надійності обладнання електронної комунікаційної мережі, в яких наряду зі стійкими відмовами враховані і збої. Показано, що при певних умовах виникаючі збої можуть суттєво погіршити показники надійності функціонування навіть при наявності структурного резерву. Тому обґрунтуванню шляхів та методів боротьби зі збоями і зменшення їх впливу на процес функціонування обладнання необхідно приділяти серйозну увагу.

Список літератури:

1. Goyal M., Soperi M., Baccelli E., Choudhury G., Shaikh A., Hosseini S. H., Trivedi K. Improving Convergence Speed and Scalability in OSPF: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2012. № 14(2). P. 443–463. URL: <https://hal.science/hal-00651596/document> (дата звернення: 7.03.2023).
2. Zhong W., Wang L., Liu Z. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020. № 8(1). P. 111–123. DOI: 10.35833/MPCE/2018.000666.
3. Kim Y., Song K., Pham H., Chang I. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time. *Symmetry*. 2022. № 14. P. 270–292. DOI: 10.3390/sym14020343.
4. Hasan O. Formal analysis of continuous-time systems using fourier transform. *Journal of symbolic computation*. 2017. DOI: 10.1016/j.jsc.2018.04.004.
5. Tandon N., Patel N. An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment. *In Proc. 10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies*. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505.
6. Wentao Z., Mathaios P., Milanovic J.V. Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory. *In Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2018. P. 78–85. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586596.
7. Ahmada W., Pervez U., Qadirb J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 78. P. 191–215. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.11.008.
8. Креденцер Б.П. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія / Б.П. Креденцер, О.М. Буточнов, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич. Київ, 2013. С. 242–264.
9. Mogilevich D, Kononova I. Improved estimates for the reliability indicators of information and communication network objects with limited source information. *Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems*. 2019. P. 101-117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.
10. ДСТУ 2860–94: Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996–01–01. *Держстандарт України*. 1994. Ст. 90.

Mogylevych D.I., Kononova I.V., Shchyhol Yu.F. RELIABILITY MODEL OF ELECTRONIC COMMUNICATION NETWORK EQUIPMENT TAKING REFUSALS AND FAILURES INTO ACCOUNT

The reliability of the subsystems and elements that make up it, as well as the complexity of the connections between them, significantly affects the effectiveness of the functioning of the electronic communication network. Despite the constant improvement of technologies for the production of highly reliable elements, nodes and blocks, as well as their assembly methods at the level of systems and complexes, the increasing complexity of modern and promising systems does not always allow ensuring the necessary reliability of their functioning.

The purpose of this study is to build a model of the reliability of objects (communication equipment) of an electronic communication network, which establishes a relationship between the reliability indicators of the object, the reliability characteristics of its structural elements and the parameters of the object's functioning process, and takes into account not only failure rates, but also as well as equipment failures.

The issue of reliability assessment of telecommunication equipment of electronic communication network, taking into account failures, is considered. It is proposed to use the regenerative process to describe the processes of changing the states of the studied system. Estimated ratios were obtained for the main reliability indicators: the probability of failure-free operation, the average working time before failure, and the availability ratio.

An example of calculating the impact of failures on system reliability indicators with structural and time redundancy is given. It was determined that under certain conditions, emerging failures can significantly worsen the reliability indicators of the functioning of the communication equipment of the electronic communication network, even in the presence of a structural reserve.

Key words: reliability models, refusals rates, failures, system reliability, structural redundancy.