

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283811

УДК 623.486

ГОР ГИРЕНКО,
РИНА КОНОНОВА,
ЮРІЙ ЩИГОЛЬ,

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ГРАНИЦЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ

При дослідженні питань забезпечення заданої надійності обладнання інформаційно-комунікаційної мережі, важливим напрямком є розроблення ефективних методів оцінки інтенсивності виникнення збоїв та їх впливу на процеси функціонування мережі. Вирішення задач оцінки та забезпечення надійності може стикатися з невизначеністю вихідної інформації через обмежену можливість отримання великої кількості досліджень випадкових величин, які визначають безвідмовність, ремонтпридатність та процес функціонування системи, що необхідні для оцінки ступеня збігу теоретичних та статистичних розподілів. Зазвичай можна точно визначити лише значення математичного очікування та дисперсії випадкової величини на основі результатів випробувань або даних експлуатації. Метою дослідження є розробка удосконаленого методу оцінки надійності обладнання інформаційно-комунікаційної мережі в умовах, коли окремі функції розподілу вихідних випадкових величин невідомі, а визначені тільки лише перший та другий їхні початкові моменти. У статті представлено удосконалений аналітичний метод, який використовується для отримання розрахункових співвідношень, необхідних для створення двосторонніх оцінок показників надійності комунікаційного обладнання інформаційно-комунікаційної мережі. У цьому методі враховуються стійкі відмови та збої в умовах апріорної невизначеності. Основна ідея запропонованого удосконаленого методу полягає у виокремленні типових функціоналів, які відображають основні показники надійності комунікаційного обладнання з часовим і (або) структурним резервуванням. Ці функціонали будуть розраховані на повній вихідній інформації та надалі використовуватись для отримання точних нижніх та верхніх границь при відомих початкових моментах розподілу вихідних випадкових величин на першому етапі. На другому етапі будуть отримані двосторонні оцінки показників надійності, застосувавши граничні значення відповідних функціоналів. Досліджено, що збої можуть значно погіршувати показники надійності, навіть якщо використовується структурне та часове резервування.

Ключові слова: інформаційно-комунікаційні мережі, показники надійності, апріорна невизначеність, відмова, збій.

Постановка проблеми. В останні роки з'явився ряд публікацій вітчизняних та зарубіжних спеціалістів в галузі надійності мереж та систем зв'язку, зокрема, інформаційно-комунікаційних мереж (ІКМ), у яких наводяться результати аналізу стану справ у даній предметній сфері [1] - [4]. Ці роботи містять гостру та обґрунтовану, на наш погляд, критику досить поширеної думки про недоцільність прийняття спеціальних цілеспрямованих заходів і проведення серйозних наукових досліджень, пов'язаних з кількісною оцінкою і забезпеченням надійності даного класу складних технічних систем. Показано, що знехтування даних питань призвело до відсутності в теперішній час достатньо розроблених теоретичних положень та

методів, необхідних для наукового обґрунтування прийнятих рішень при модернізації існуючих і побудові нових перспективних мереж та систем зв'язку. Відсутність науково обґрунтованих вимог щодо експлуатаційно-технічних характеристик, і зокрема, за показниками надійності може спричинити серйозні наслідки, усунення яких вимагатиме значних часових, людських та матеріальних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Своєю актуальність зберігає розробка теоретичних положень та науково-методичного апарату (методів, моделей і методик), необхідного для кількісної оцінки реального рівня надійності сучасних і перспективних ІКМ та наукового обґрунтування шляхів і методів забезпечення заданого рівня. При розробці такого апарату для підвищення достовірності прийнятих рішень необхідно враховувати основні особливості функціонування ІКМ, а також всі суттєві чинники, які впливають на показники надійності.

Слід відмітити два важливі фактори, урахування яких при дослідженні надійності ІКМ викликає серйозні труднощі: “апріорна невизначеність” та збої. Під терміном “апріорна невизначеність” будемо розуміти наявність неповної інформації про закони розподілу вихідних випадкових величин, що характеризують надійність окремих елементів, складових частин або мережі зв'язку в цілому, а також процес її функціонування. Наявність невизначеності вихідної інформації при вирішенні задач оцінки та забезпечення надійності обумовлена тим, що в багатьох випадках не можливо отримати досить великий обсяг вибірки випадкових величин, які характеризують безвідмовність, ремонтпридатність та процес функціонування досліджуваної системи, необхідний для оцінки степеня погодженості теоретичного і статистичного розподілів. Частіше вдається, наприклад, за результатами випробувань або за даними експлуатації досить точно визначити тільки оцінку математичного очікування та дисперсії випадкової величини. При цьому істинну функцію розподілу цієї випадкової величини однозначно визначити не вдається, але відомо, що вона належить множині всіх можливих теоретичних розподілів позитивних випадкових величин з фіксованим математичним очікуванням та дисперсією.

Другою суттєвою особливістю ІКМ з точки зору надійності є те, що в них з'являється нове джерело відмов – збої в роботі протоколів маршрутизаторів, збої у електроживленні, а також збої оптичного обладнання, які обумовлюють відмови в транспортних мережах [5], [6]. Кожна відмова (збій) у мережі інформаційно-комунікаційних мереж веде до припинення інформаційного обміну на десятки секунд, що викликає втрати гігабіт даних і, як слідство, суттєво знижує готовність мережі [7].

Аналіз публікацій в даній предметній області показав, що переважну більшість результатів оцінки надійності об'єктів радіоелектронної техніки, і зокрема, телекомунікаційного обладнання ІКМ отримано при допущенні про наявність повної вихідної інформації, щодо досліджуваних процесів функціонування без урахування збоїв (враховувались лише стійкі відмови обладнання) [8], [9].

Метою роботи є розробка аналітичного методу оцінки надійності телекомунікаційного обладнання ІКМ в умовах, коли окремі функції розподілу вихідних випадкових величин невідомі, а визначені тільки лише перший (s_1) та другий (s_2) їхні початкові моменти. При цьому отримати в загальному виді точні значення показників надійності неможливо, і задача полягає в знаходженні двосторонніх оцінок (точних нижніх та верхніх границь) цих показників, коли невідомі функції розподілу належать деякому фіксованому класу розподілів [10].

Виклад основного матеріалу дослідження. *Постановка задачі.* Розглянемо телекомунікаційне обладнання, яке в подальшому для спрощення будемо називати системою S . Нехай система S характеризується множиною вихідних даних, що утворюють в загальному випадку чотири непересічні підмножини:

$$X_s = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}; H_s = \{h_1, h_2, \dots, h_j\}; Y_s = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}; R_s = \{r_1, r_2, \dots, r_\alpha\},$$

так що $X_s \subset G_s$, $H_s \subset G_s$, $Y_s \subset G_s$, $R_s \subset G_s$. Підмножина X_s характеризує сукупність параметрів структури, взаємозв'язків окремих елементів, а також часові параметри системи; H_s – сукупність характеристик надійності елементів; Y_s – види та параметри використовуваної надлишковості; R_s – сукупність параметрів ремонтного органу. Будемо вважати, що інформація про функції розподілу деяких випадкових величин, що характеризують процес функціонування системи, обмежена знанням тільки перших двох початкових моментів (s_1 і s_2) цих випадкових величин.

Необхідно обґрунтувати аналітичний метод, що дозволяє визначати двосторонні оцінки (нижню та верхню границі) показників надійності системи в указаних вище умовах обмеженості вихідної інформації [10].

Обґрунтування методу вирішення задачі. Для вирішення сформульованої задачі доцільно використати той факт, що в багатьох відомих розрахункових співвідношеннях для показників надійності, які отримані при повній вихідній інформації, входять функціонали спеціального виду (лінійні або дробово-лінійні), значення яких залежать від виду функцій розподілу вихідних випадкових величин, про які апріорна інформація обмежена знанням лише початкових моментів. Ці функціонали мають вигляд:

$$I(F) = \int_0^{\infty} g(x) dF(x), \quad (1)$$

$$I(F_1, F_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} g(x_1, \dots, x_n) dF_1(x_1) \dots dF_n(x_n),$$

$$J(F) = \frac{I_1(F)}{I_2(F)} = \frac{\int_0^{\infty} g_1(x) dF(x)}{\int_0^{\infty} g_2(x) dF(x)}, \quad (2)$$

де $g(x)$ – задана функція, що має скінченні значення в кожній точці x , обмежена, може бути диференційованою, неперервною або кусково-неперервною з кінцевим числом точок розриву, а найголовніше – залежить від параметрів.

Припускається також, що для функції $g(x)$ відомі усі точки розриву або кутові точки, точки екстремуму, перегину т, тобто функція $g(x)$ піддається аналітичному дослідженню. Тому в даній статті запропоновано аналітичний метод побудови двосторонніх границь показників надійності, в основі якого лежить вказана вище особливість.

Незважаючи на те, що до теперішнього часу загальна теорія та методи вирішення подібних задач розроблені досить повно, знаходження екстремумів і граничних розподілів для конкретних функціоналів аналітичними методами, за образним висловом, залишається скоріше мистецтвом. Тому, виникає необхідність подальшого розвитку зазначеного вище загального аналітичного підходу в прикладному плані для визначення двосторонніх оцінок (точних граничних значень) функціоналів, що характеризують надійність об'єктів телекомунікацій з часовою і (або) структурною надлишковістю.

Сутність запропонованого аналітичного методу полягає у виділенні типових функціоналів, через які виражаються основні показники надійності телекомунікаційного обладнання з часовим і (або) структурним резервуванням, отримані при повній вихідній інформації, і побудові точних нижніх і верхніх границь цих функціоналів при відомих

початкових моментах розподілу вихідних випадкових величин (перший етап) з наступним отриманням двосторонніх оцінок (нижньої та верхньої границь) показників надійності шляхом підстановки в них граничних значень відповідних функціоналів (другий етап).

Найважчим завданням є побудова точних нижніх та верхніх границь функціоналів, що характеризують надійність об'єктів (реалізація першого етапу методу). Розглянемо можливі підходи до його розв'язку.

Аналіз аналітичних виразів для показників надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з часовим і (або) структурним резервуванням, отриманих при повній вихідній інформації, дозволив виділити два види лінійних функціоналів, які входять в ці вирази [11]:

$$I_1(F_{\Pi}) = F_{\Pi}(t_d) = \int_0^{t_d} g(x, t_d) dF_{\Pi}(x), \quad (3)$$

$$\text{де } g(x, t_d) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq x < t_d, \\ 0 & \text{при } 0 \geq t_d; \end{cases}$$

$$I_2(F_B) = \int_0^{\infty} \frac{x^{m-1}}{(m-l)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_B(t)) dt \right]^{l-1} \frac{1 - F_B(x)}{(l-1)!} dx, \quad (4)$$

де $F_{\Pi}(x)$ – функція розподілу часу підключення структурного резерву; t_d – допустимий час підключення (часовий резерв); $F_B(x)$ – функція розподілу часу відновлення працездатності телекомунікаційного обладнання; m – число елементів структурного резерву; l – число ремонтних бригад в ремонтному органі [11].

Розглянемо функціонал $I_1(F_{\Pi})$. Нехай функція розподілу, що входить в цей функціонал $F_{\Pi}(x)$ невідома, а визначені тільки лише два початкові моменти

$$s_1 = \int_0^{\infty} x dF_{\Pi}(x) \text{ і } s_2 = \int_0^{\infty} x^2 dF_{\Pi}(x), \quad s_1^2 < s_2, \quad (5)$$

і нехай вона належить множині функцій розподілу K_2 , що задовольняють обмеженням (5).

Необхідно знайти точні нижню $\inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$ і верхню $\sup_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$ границі функціонала

$I_1(F_{\Pi})$ (формула (3)).

При вирішенні цієї задачі використовуємо результати, отримані в [10], що визначають необхідні та достатні умови екстремуму лінійних і дробово-лінійних функціоналів (формули (1) і (2)) на чотирьох класах функцій розподілу. За допомогою цих результатів можна показати, що східчаста функція розподілу $F_0(x)$ із точками росту x_1, x_2, x_3 є граничною, якщо многочлен $U_0 = u_1 + u_2x + u_3x^2$ задовольняє умову

$$U_0(x) \leq g(x, t_d)$$

для всіх $x \geq 0$ при пошуку мінімального значення інтеграла (3) або умові

$$U_0(x) \geq g(x, t_d)$$

(при пошуку максимального значення цього інтеграла). Коефіцієнти цього многочлена u_i , $i = \overline{1,3}$, визначаються з рівності $g(x_i, t_d) = U_0(x_i)$, $i = \overline{1,3}$. Для наочності доводяться результати, що представлені в табл. 1 [11].

Таблиця 1 – Нижні та верхні оцінки функціонала $I_1(F_{\Pi})$

Зміна параметра $t_{\text{д}}$	$\inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$	Точки росту граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлен и $U_0(x)$	$\sup_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$	Точки росту граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлен и $U_0(x)$
$0 < t_{\text{д}} < s_1$	0	$x_1 = t_{\text{д}},$ $x_2 = n,$ $n \rightarrow \infty$	$U_0(x) = 0$	$\frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1 t_{\text{д}} + t_{\text{д}}^2}$	$x_1 = t_{\text{д}},$ $x_2 = \frac{s_2 - s_1 t_{\text{д}}}{s_1 - t_{\text{д}}}$	$U_0(x) = \frac{(x - x_2)^2}{(t_{\text{д}} - x_2)^2}$
$s_1 \leq t_{\text{д}} < \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{t_{\text{д}} - s_1}{t_{\text{д}}}$	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_{\text{д}}$	$U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_{\text{д}}}$	1	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_{\text{д}}$	$U_0(x) = 1$
$t_{\text{д}} \geq \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{(t_{\text{д}} - s_1)^2}{s_2 - 2s_1 t_{\text{д}} + t_{\text{д}}^2}$	$x_1 = \frac{s_1 t_{\text{д}} - s_2}{t_{\text{д}} - s_1},$ $x_2 = t_{\text{д}}$	$U_0(x) = 1 - \frac{(x - x_1)^2}{(t_{\text{д}} - x_1)^2}$	1	$x_1 = \frac{s_1 t_{\text{д}} - s_2}{t_{\text{д}} - s_1},$ $x_2 = t_{\text{д}}$	$U_0(x) = 1$

Якщо відомо, що випадкова величина з функцією розподілу $F_{\Pi}(x)$ не приймає значень, більших ніж Q , тобто $F_{\Pi}(Q+0)=1$, тоді нижні оцінки функціонала $I_1(F_{\Pi})$ (формула (3)) в областях $0 < t_{\text{д}} < s_1$ та $t_{\text{д}} > \frac{s_2}{s_1}$ і верхні оцінки в областях $0 < t_{\text{д}} < s_1$ і $t_{\text{д}} > \frac{s_2}{s_1}$ збігаються з наведеними в табл. 1.

При $s_1 < t_{\text{д}} \leq \frac{s_2}{s_1}$ найменше значення

$$\inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi}) = \frac{s_2 - s_1(t_{\text{д}} + Q) + t_{\text{д}}Q}{t_{\text{д}}Q}, \tag{6}$$

а найбільше

$$\sup_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi}) = 1 - \frac{(s_2 - s_1 t_{\text{д}})}{Q(Q - t_{\text{д}})}, \tag{7}$$

так як точки росту граничних функцій розподілу $x_1 = 0$, $x_2 = T$, $x_3 = Q$, а стрибки в них p_i , $i = \overline{1,3}$, визначаються з моментних умов.

Необхідність в отриманні наведених оцінок виникає при розрахунках ймовірності відмови об'єкта з часовим резервуванням при невідповідній величині резерву часу $t_{\text{д}} = \text{const}$ та наявності інформації тільки про математичне очікування s_1 і дисперсію $\sigma^2 = s_2 - s_1^2$ часу підключення резерву.

Розглянемо тепер функціонал $I_2(F_{\text{В}})$ (формула (4)), що залежить від функції розподілу $F_{\text{В}}(x)$, який входить у формули для показників надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання, що містять $m \geq 1$ резервних елементів, отриманими при повній вихідній інформації. Обмежимо розглядом двох крайніх випадків: обмеженого ($l=1$) або необмеженого ($l=m$) відновлення елементів, що відмовили, у ремонтному органі. У цих

випадках неважко визначити точні значення функціоналу $I_2(F_B)$ шляхом підстановки у формулу (4) значень $l=1$ і $l=m$. У результаті отримаємо

$$I(F_B) = \begin{cases} \beta_m/m! & \text{при } l=1, \\ \beta_1^m/m! & \text{при } l=m, \end{cases} \quad (8)$$

де β_m – m -й початковий момент розподілу $F_B(x)$.

Двосторонні оцінки показників надійності телекомунікаційного обладнання з часовим та структурним резервуванням. Розглянемо систему S (телекомунікаційне обладнання), яка в загальному випадку складається з $n \geq 1$ основних (робочих) та $m \geq 1$ резервних елементів (для спрощення будемо вважати всі елементи ідентичними). Будемо також вважати, що елементи резерву можуть знаходитись в навантаженому (коефіцієнт навантаження $\alpha = 1$), полегшеному ($0 < \alpha < 1$) або ненавантаженому ($\alpha = 0$) режимах. Нехай в основних елементах обладнання наряду зі стійкими відмовам можуть виникати і збої з інтенсивністю λ_3 . При відмові одного з основних елементів або збої підключається один з резервних елементів, при цьому час підключення – випадкова величина t_{Π} з невідомою функцією розподілу $F_{\Pi}(t)$, а відомими лише двома початковими моментами s_1 та s_2 . Елементи, що відмовили, поступають на ремонт. Ремонтний орган включає в себе l ремонтних бригад ($l \geq 1$) з невідомим розподілом тривалості відновлення працездатності $F_B(t)$, а відомими лише двома початковими моментами $\beta_1 = \bar{t}_B$ і β_2 . Кожна бригада може одночасно ремонтувати тільки один елемент, що відмовив, і кожний елемент відновлюється лише однією з l бригад. Якщо всі бригади зайняті і відмовляє ще один елемент, то він становиться в чергу на ремонт. Бригада, яка закінчила відновлення одного з елементів, бере на ремонт перший непрацездатний елемент з тих, що стоїть у черзі. Будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості елементів, а в ремонтному органі реалізовано «швидке» відновлення $\left(\bar{t}_B \ll \frac{1}{\lambda}\right)$.

Відмова системи (зрив функціонування) виникає в момент перевищення часом підключення допустимого значення t_d (часового резерву) або в момент відмови $(m+1)$ -го елемента.

Для даної системи отримані формули для показників надійності (середнього напрацювання до відмови $T_0(t_d)$, ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, t_d)$, середнього часу відновлення T_B , коефіцієнта готовності $K_{\Gamma}(t_d)$) та коефіцієнта оперативної готовності $P_{\text{ог}}(t, t_d)$ при повній вихідній інформації, в які входять функціонали $I_1(F_{\Pi})$ і $I_2(F_B)$ [11]:

$$T_0(t_d) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{x p^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n + i\alpha) + q(n + k_3) \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$P(t, t_d) = \exp[-t/T_0(t_d)]; \quad (10)$$

$$T_B(t_d) = \frac{1}{q_1 + q_2} (q_1 T_B^* + q_2 T_{\Pi}^*(t_d)); \quad (11)$$

$$K_{\Gamma}(t_d) = \frac{T_0(t_d)}{T_0(t_d) + T_B(t_d)} = \left[1 + \frac{T_B(t_d)}{T_0(t_d)} \right]^{-1}; \quad (12)$$

$$P_{\text{ог}}(t, t_d) = K_{\Gamma}(t_d) \exp[-t/T_0(t_d)]. \quad (13)$$

У формулах (9) - (13) прийняті наступні позначення: $k_3 = \lambda_3/\lambda$; $\rho = \lambda\beta_1$; $x = \beta_m/\beta_1$ при $l=1$; $x=1$ при $l \geq m$; $q = 1 - F_{\Pi}(t_{\text{д}}) = P\{t_{\Pi} > t_{\text{д}}\}$; $q_1 = \frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n + i\alpha)$; $q_2 = \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{(n+m)\lambda + \lambda_3}$;

$$T_{\text{в}}^* = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m}, & l=1, \\ \frac{\beta_1}{m+1}, & l=m+1; \end{cases} \quad (14)$$

$$T_{\Pi}^*(t_{\text{д}}) = \frac{t_{\text{д}}}{1 - F_{\Pi}(t_{\text{д}})} - t_{\text{д}} = I_3(F_{\Pi}). \quad (15)$$

Для функціонала $I_3(F_{\Pi})$ отримані двосторонні оцінки (нижня $\underline{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}})$ і верхня $\bar{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}})$ границі) [11]:

$$\underline{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}}) = \inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_3(F_{\Pi}) = \begin{cases} s_1 - t_{\text{д}} & \text{при } 0 < t_{\text{д}} < s_1, \\ 0 & \text{при } s_1 < t_{\text{д}} < \frac{s_2}{s_1}; \end{cases} \quad (16)$$

$$\bar{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}}) = \sup_{F_{\Pi} \in K_2^Q} I_3(F_{\Pi}) = \begin{cases} \frac{s_2 - 2s_1t_{\text{д}} + t_{\text{д}}^2}{s_1 - t_{\text{д}}} & \text{при } 0 < t_{\text{д}} < s_1, \\ Q - t_{\text{д}} & \text{при } s_1 < t_{\text{д}} < \frac{s_2}{s_1}. \end{cases} \quad (17)$$

В табл. 2 наведені вирази для нижньої q_* та верхньої q^* границь функціоналу $q = 1 - I_1(F_{\Pi})$, отримані з використанням двосторонніх оцінок функціоналу $I_1(F_{\Pi})$ (табл. 1):

$$q_* = \sup_{F_{\Pi} \in K_2^Q} I_3(F_{\Pi}); \quad q^* = \inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi}).$$

Таблиця 2 – Граничні значення функціоналу q

Області зміни параметру	Нижня границя q_*	Верхня границя q^*
$0 < t_{\text{д}} < s_1$	$\frac{(s_1 - t_{\text{д}})^2}{s_2 - 2s_1t_{\text{д}} + t_{\text{д}}^2}$	1
$s_1 \leq t_{\text{д}} < \frac{s_2}{s_1}$	0	$\frac{s_1}{t_{\text{д}}}$
$t_{\text{д}} \geq \frac{s_2}{s_1}$	0	$\frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1t_{\text{д}} + t_{\text{д}}^2}$

Наведемо аналітичні вирази для показників надійності системи при обмеженій вихідній інформації. Двосторонні оцінки середнього напрацювання до відмови системи ($\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}})$,

$\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}})$) отримаємо після підстановки граничних значень (q_* і q^*) функціоналу q (табл. 2) в формулу (9):

– для навантаженого резерву

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n+i) + q^*(n+k_3) \right]^{-1}, \quad (18)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n+i) + q_*(n+k_3) \right]^{-1}; \quad (19)$$

– для полегшеного резерву ($0 < \alpha < 1$)

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n+i\alpha) + q^*(n+k_3) \right]^{-1}, \quad (20)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n+i\alpha) + q_*(n+k_3) \right]^{-1}; \quad (21)$$

– для ненавантаженого резерву

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{xn(n\rho)^m}{m!} + q^*(n+k_3) \right]^{-1}, \quad (22)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}}) = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{xn(n\rho)^m}{m!} + q_*(n+k_3) \right]^{-1}. \quad (23)$$

Для розрахунку граничних значень ймовірності безвідмовного функціонування та коефіцієнта готовності можуть бути використані формули:

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} P(t, t_{\text{д}}) = \exp \left(- \frac{t}{\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}})} \right), \quad (24)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} P(t, t_{\text{д}}) = \exp \left(- \frac{t}{\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}})} \right); \quad (25)$$

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_{\text{в}}(t_{\text{д}}) = \frac{1}{q_1 + \bar{q}_2} [q_1 T_{\text{в}}^* + \bar{q}_2 \bar{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}})], \quad (26)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_{\text{в}}(t_{\text{д}}) = \frac{1}{q_1 + \underline{q}_2} [q_1 T_{\text{в}}^* + \underline{q}_2 \bar{T}_{\Pi}^*(t_{\text{д}})]; \quad (27)$$

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} K_{\Gamma}(t_{\text{д}}) = \left[1 + \frac{\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_{\text{в}}(t_{\text{д}})}{\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{д}})} \right]^{-1}, \quad (28)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} K_{\Gamma}(t_{\text{Д}}) = \left[1 + \frac{\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_{\text{В}}(t_{\text{Д}})}{\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{Д}})} \right]^{-1}; \quad (29)$$

$$\min_{F_{\Pi} \in K_2} P_{\text{ОГ}}(t, t_{\text{Д}}) = \min_{F_{\Pi} \in K_2} K_{\Gamma}(t_{\text{Д}}) \exp \left[-\frac{t}{\min_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{Д}})} \right]^{-1}, \quad (30)$$

$$\max_{F_{\Pi} \in K_2} P_{\text{ОГ}}(t, t_{\text{Д}}) = \max_{F_{\Pi} \in K_2} K_{\Gamma}(t_{\text{Д}}) \exp \left[-\frac{t}{\max_{F_{\Pi} \in K_2} T_0(t_{\text{Д}})} \right]^{-1}. \quad (31)$$

В формулах (21) та (22) прийняті наступні позначення:

$$\begin{aligned} \underline{T}_{\Pi}^*(t_{\text{Д}}) &= \frac{q_*(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3}; \\ \bar{T}_{\Pi}^*(t_{\text{Д}}) &= \frac{q^*(n\lambda + \lambda_3)}{(n+m)\lambda + \lambda_3}, \end{aligned} \quad (32)$$

де q_* і q^* наведено в табл. 2.

Числовий приклад. Розглянемо пристрій комутації, який широко застосовується у військовій мережі зв'язку. Нехай це пристрій з точки зору надійності представляє собою дубльований об'єкт, який містить один основний пристрій ($n=1$) і один резервний ($m=1$), що знаходиться в ненавантаженому режимі ($\alpha=0$).

Оцінимо надійність даного пристрою (визначимо граничні значення наведених вище показників) при наступних вихідних даних:

$$\lambda = 10^{-4} \text{ 1/год}; \quad \bar{t}_{\text{В}} = \beta_1 = 24 \text{ год}; \quad \beta_2 = 800 \text{ год}^2;$$

$$l = 1; \quad \bar{t}_{\Pi} = s_1 = 10 \text{ с}; \quad t_{\text{Д}} = 8 \text{ с}; \quad s_2 = 120 \text{ с};$$

$$k_3 = \lambda_3/\lambda = 5; \quad t = 24 \text{ год}.$$

Після підстановки цих вихідних даних в наведені вище формули (13), (19), (24) – (32) отримаємо результати розрахунку, які зведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку в числовому прикладі

Двосторонні оцінки показників	Показники надійності			
	$T_0(t_{\text{Д}})$, год	$P(t, t_{\text{Д}})$	$T_{\text{В}}(t_{\text{Д}})$, год	$P_{\text{ОГ}}(t, t_{\text{Д}})$
Нижня границя	1665	0,986	0,04	0,9858
Верхня границя	9956	0,9975	0,242	0,9974

Таким чином, для заданих вихідних даних ми отримали інтервали, обмежені розрахованими двосторонніми оцінками показників, всередині яких знаходяться невідомі нам показники надійності телекомунікаційного обладнання, що представляє собою дубльований комплект пристрою комутації.

Висновки. В статті розглянуто аналітичний метод отримання розрахункових співвідношень для побудови двосторонніх границь показників надійності

телекомунікаційного обладнання інформаційно-комунікаційних мереж з урахуванням стійких відмов та збоїв в умовах апріорної невизначеності. Показано, що збої можуть суттєво погіршувати показники надійності навіть за наявності структурного і часового резервування. Тому при дослідженні питань забезпечення необхідного рівня надійності обладнання інформаційно-комунікаційних мереж одним з важливих напрямків повинно бути обґрунтування ефективних методів зменшення інтенсивності збоїв та їх впливу на процеси функціонування цього класу складних інформаційно-розрахункових систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] M. Goyal, M. Soperi, E. Baccelli, G. Choudhury, A. Shaikh, and S. K. Hosseini, “Trivedi improving convergence speed and Scalability in OSPF: A Survey”, *IEEE Communications Surveys&*, vol. 14 (2), pp. 443-463, 2012.
- [2] W. Zhong, L. Wang, Z. Liu, and S. Hou “Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 111-123, 2020, doi: <https://doi.org/10.35833/MPCE/2018.000666>.
- [3] Y. Kim, K. Song, H. Pham, and I. Chang “A software reliability model with dependent failure and optimal release time”, *Symmetry*, vol. 14, pp. 343, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/sym14020343>.
- [4] N. Tandon, and N. Patel, “An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment”, in *Proc. 10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kanpur, India, pp. 1-6. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505>.
- [5] K. K. Raghuvanshi, A. Agarwal, J. Khushboo, and V. B. Singh, “A time-variant fault detection software reliability model”, *SN Applied Sciences*, iss. 3, art. 18, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.
- [6] Z. Wentao, P. Mathaios, and J. Milanovic, “Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory”, in *Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. pp. 78-85, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586596>.
- [7] ДСТУ 2860–94: Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996–01–01. *Держстандарт України*. С. 90, 1994.
- [8] I. Subach, D. Mogylevych, A. Mykytiuk, V. Kubrak, and S. Korotayev, “Design methodology of cybersecurity situational center”, in *Proc. Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS-II-2021)*, Kyiv, 2021, vol. 3187, pp. 79-87.
- [9] P. Rafiee, and G. L. Shabgahi, “Evaluating the reliability of communication networks (WAN) using their fuzzy fault tree analysis – a case study”, *The Journal of Mathematics and Computer Science*, pp. 262-270, 2011, doi: <https://doi.org/1010.22436/jmcs.002.02.06>.
- [10] Б. П. Креденцер, О. І. Буточнов, А. І. Міночкін, та Д. І. Могилевич, *Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація. Монографія*. Київ, Україна: Фенікс, 2013.
- [11] D. Mogylevych, and I. Kononova, “Improved estimates for the reliability indicators of information and communication network objects with limited source information”, *UKRMICO-2018: Advances in Information and Communication Technologies, in Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, vol. 560, pp. 101-117, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_5.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2023.

REFERENCE

- [1] M. Goyal, M. Soperi, E. Baccelli, G. Choudhury, A. Shaikh, and S. K. Hosseini, “Trivedi improving convergence speed and Scalability in OSPF: A Survey”, *IEEE Communications Surveys&*, vol. 14 (2), pp. 443-463, 2012.
- [2] W. Zhong, L. Wang, Z. Liu, and S. Hou “Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 111-123, 2020. doi: <https://doi.org/10.35833/MPCE/2018.000666>.
- [3] Y. Kim, K. Song, H. Pham, and I. Chang “A software reliability model with dependent failure and optimal release time”, *Symmetry*, vol. 14, pp. 343, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/sym14020343>.
- [4] N. Tandon, and N. Patel, “An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment”, in *Proc. 10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kanpur, India, pp. 1-6. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505>.
- [5] K. K. Raghuvanshi, A. Agarwal, J. Khushboo, and V. B. Singh, “A time-variant fault detection software reliability model”, *SN Applied Sciences*, iss. 3, art. 18, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.
- [6] Z. Wentao, P. Mathaios, and J. Milanovic, “Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory”, in *Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. pp. 78-85, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586596>.
- [7] DSTU 2860–94: Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia. Chynnyi vid 1996–01–01. *Derzhstandart Ukrainy*. pp. 90, 1994.
- [8] I. Subach, D. Mogylevych, A. Mykytiuk, V. Kubrak, and S. Korotayev, “Design methodology of cybersecurity situational center”, in *Proc. Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS-II-2021)*, Kyiv, 2021, vol. 3187, pp. 79-87.
- [9] P. Rafiee, and G. L. Shabgahi, “Evaluating the reliability of communication networks (WAN) using their fuzzy fault tree analysis – a case study”, *The Journal of Mathematics and Computer Science*, pp. 262-270, 2011, doi: <https://doi.org/1010.22436/jmcs.002.02.06>.
- [10] B. P. Kredentser, O. I. Butochnov, O. I. Minochkin, and D. I. Mohylevych, *Nadiinist system z nadylyshkovistiui: metody, modeli, optymizatsiia. Monohrafiia*. Kyiv, Ukraine: Phoenix, 2013.
- [11] D. Mogylevych, and I. Kononova, “Improved estimates for the reliability indicators of information and communication network objects with limited source information”, *UKRMICO-2018: Advances in Information and Communication Technologies, in Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, vol. 560, pp. 101–117, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_5.

IGOR GYRENKO,
IRYNA KONONOVA,
YURII SHCHYHOL

IMPROVED METHOD OF CONSTRUCTING TWO-SIDED BOUNDARIES OF RELIABILITY INDICATORS OF INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORK EQUIPMENT WITH LIMITED OUTPUT INFORMATION

When researching issues of ensuring the specified reliability of information and communication network equipment, an important direction is the development of effective methods

for assessing the intensity of failures and their impact on the processes of network functioning. Solving the problems of assessment and ensuring reliability may face the uncertainty of the source information due to the limited possibility of obtaining a large number of studies of random variables that determine the reliability, maintainability and process of system functioning, which are necessary to assess the degree of coincidence of theoretical and statistical distributions. Usually, only the mathematical expectation and variance of the random variable can be accurately determined from test results or operational data. The purpose of the study is to develop an improved method for assessing the reliability of information and communication network equipment in conditions where individual distribution functions of the initial random variables are unknown, and only their first and second initial moments are determined. The article presents an improved analytical method, which is used to obtain calculation ratios necessary for the creation of two-way evaluations of the reliability indicators of the communication equipment of the information and communication network. In this method, persistent disruption and failures under conditions of a priori uncertainty are taken into account. The main idea of the proposed improved method is to single out typical functionals that reflect the main reliability indicators of communication equipment with time and (or) structural redundancy. These functionals will be calculated on the complete initial information and further used to obtain accurate lower and upper bounds at known initial moments of the distribution of initial random variables at the first stage. At the second stage, bilateral estimates of reliability indicators will be obtained by applying the limit values of the corresponding functionals. It has been found that failures can significantly degrade reliability performance, even when structural and temporal redundancy is used.

Keywords: information and communication networks, reliability indicators, a priori uncertainty, disruption, failure.

Гиренко Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника інституту з навчальної роботи, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-7688-7926, igor_girenko@ukr.net.

Кононова Ірина Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент Спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0000-0001-6945-0323, viti21@ukr.net.

Щиголь Юрій Федорович, кандидат юридичних наук, доцент Спеціальної кафедри № 1, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-7621-0616, robotgora@gmail.com.

Gyrenko Igor, candidate of technical sciences, deputy chief of the Institute for Academic Affairs, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Kononova Iryna, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of Special department No. 3, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Shchyhol Yurii, candidate of juridical sciences, associate professor of Special department No. 1, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.