

Тихонов М.В.

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

Кононова І.В.

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

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Оцінка показників надійності складних технічних систем, до яких відноситься і комунікаційне обладнання сучасних мереж зв'язку, на етапах створення та експлуатації здійснюється, як правило, в умовах апріорної невизначеності вихідних даних. Наявність невизначеності (неповноти, недостовірності) вихідної інформації при розв'язанні задач оцінки показників надійності комунікаційного обладнання обумовлено тим, що в багатьох випадках не представляється можливим отримати достатньо великий об'єм вибірки випадкових величин, що характеризують безвідмовність, ремонтпридатність та процес функціонування досліджуваної системи.

Предметом теоретичного дослідження є процеси функціонування комунікаційного обладнання в умовах обмеженої надійності програмних засобів. Метою роботи є розробка удосконаленої методики побудови двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування об'єктів комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу при обмеженій вихідній інформації. Запропоновано удосконалену методику, в основі якої покладено використання математичних моделей оцінки надійності, отриманих при повній вихідній інформації. Сутність удосконалення методики, що визначає її новизну та відмінність від відомих, полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов та збоїв на надійність функціонування та входить у формули для показників надійності комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу, і побудові нижньої та верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності комунікаційного обладнання шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

Удосконалена методика дає можливість побудувати нові математичні моделі надійності, теоретичне дослідження яких дозволяє провести комплексну оцінку надійності функціонування комунікаційного обладнання при сумісному урахуванні поповнюваної та непоповнюваної складових комбінованого резерву часу, різних типів відмов і збоїв та їх наслідків.

Ключові слова: програмні засоби, показники надійності, збої, відмови, комунікаційне обладнання, комбінований резерв часу.

Постановка проблеми. На етапах розробки та використання складних технічних систем, як правило, доводиться оцінювати показники надійності в умовах апріорної невизначеності вихідних даних. Під терміном “апріорна невизначеність” зазвичай розуміють відсутність або наявність неповної інформації про закони розподілу випадкових величин, які характеризують надійність окремих елементів, складових частин або системи в цілому, а також процес її функціонування [1]. Неповнота інформації характеризується також можливою відсутністю відомостей про залежності елементів системи. Це типове явище, з яким стикаються практично на всіх етапах життєвого циклу складних технічних систем. В таких випад-

ках отримати точні значення показників надійності досліджуваної системи не представляється можливим, а задача полягає в знаходженні двосторонніх оцінок (точних нижніх та верхніх границь) цих показників, коли невідомі функції розподілу вихідних випадкових величин належать деякій фіксованій множині розподілів. Тому, виникає необхідність подальшого розвитку в прикладному плані загального аналітичного розв'язання задачі знаходження екстремальних функцій розподілу для розрахунку нижніх та верхніх границь функціоналів, які характеризують надійність функціонування КО з комбінованим резервом часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання оцінки показників надійності КО та забез-

печення їх високого рівня розглядалися в роботах вітчизняних та закордонних вчених [2–6].

В розглянутих наукових працях прийняте допущення про повну та достовірну вихідну інформацію, що не завжди виконується на практиці. Частіше доводиться зіткнутись із ситуацією, коли функції розподілу вихідної інформації випадкових величин невідомі, а визначені лише деякі їх числові характеристики, наприклад, перші два початкові моменти.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка удосконаленої методики побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування об'єктів КО з комбінованим резервом часу.

Виклад основного матеріалу. В основі запропонованої удосконаленої методики покладено розглянутий в [7] аналітичний метод визначення двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів при обмеженій вихідній інформації, який використовується для дослідження надійності систем з комбінованим резервом часу (t_d, t_p) , що містить поповнювану t_d та непоповнювану t_p складові загального часового резерву. Аналіз особливостей функціонування таких систем, проведений у [8], показує, що поповнювана складова t_d використовується на першому етапі перевірки часових обмежень $(t_b \leq t_d)$ після виникнення відмови та витрачається при відновленні працездатного об'єкту. Тому у функціонал, характеризуючий безвідмовність об'єкту (будемо його називати базовим функціоналом), входить в якості вихідних даних функція розподілу часу t_b відновлення $F_b(t)$, точний вид якої невідомий, а визначені тільки два початкових моменти цієї випадкової величини.

Таким чином, сутність запропонованої методики полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив на надійність КО збоїв та відмов і входить в показники надійності об'єктів з комбінованим резервом часу, отримані при повній вихідній інформації, і побудові точних нижніх та верхніх границь цього функціоналу при відомих початкових моментах часу відновлення працездатності об'єкта з подальшим отриманням двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування КО шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

В загальному випадку реалізація даної методики включає в себе виконання наступних етапів:

1. Вибір типових функціоналів, характеризуючих надійність резервованих систем;

2. Побудова для даних функціоналів точних нижніх та верхніх границь;

3. Отримання двосторонніх оцінок (нижньої та верхньої границь) показників надійності резервованих систем шляхом підстановки граничних значень функціоналів у формули, отримані при повній вихідній інформації.

Аналіз показав, що найбільш складною є реалізація другої задачі.

Розглянемо її розв'язання більш детально. Побудова двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) для базового функціоналу. Аналіз показав, що отримана у [9] при повній вихідній інформації сукупність нових розрахункових формул для основних показників надійності об'єктів з комбінованим резервом часу містить базовий лінійний функціонал, що характеризує безвідмовність об'єкта при використанні поповнюваної складової t_d загального резерву часу (t_d, t_p) . Цей функціонал має вид:

$$I(F_b) = F_b(t_d) = \int_0^{t_d} dF_b(x) = \int_0^{t_d} g(x, t_d) dF_b(x), \quad (1)$$

де

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

Нехай закон розподілу $F_b(x)$ довільний і вид його невідомий, а визначені лише два його початкових моменти $s_1 = \int_0^\infty x dF_b(x)$ та $s_2 = \int_0^\infty x^2 dF_b(x)$. Позначимо через K_2 множину функцій розподілу $F_b(x)$ таких, що $F_b(0) = 0$; $\int_0^\infty dF_b(x) = 1$; $\int_0^\infty x^i dF_b(x) = s_i$, $i = 1, 2$; $0 < s_1^2 < s_2 < \infty$.

Необхідно знайти точні нижню $\inf_{F_b \in K_2} I(F_b)$ та верхню $\sup_{F_b \in K_2} I(F_b)$ границі функціоналу $I(F_b)$ з використанням необхідних та достатніх умов існування екстремуму лінійних функціоналів [9]. Запис $F_b \in K_2$ означає, що невідома функція розподілу $F_b(x)$ належить множині функцій розподілу $K_2(s_1, s_2)$ позитивних випадкових величин з фіксованими початковими моментами s_1 та s_2 . Нижче наводиться розв'язання цієї задачі.

Нижні та верхні оцінки функціоналу $I(F_b)$ для різних областей змін величини резерву часу t_d наведено в табл. 1.

При отриманні цих оцінок використані результати, наведені в [9], за допомогою яких можна показати, що ступенева функція розподілу $I_0(x)$ з точкам росту x_1, x_2, x_3 є граничною, якщо багаточлен $U_0(x) = u_1 + u_2x + u_3x^2$ задовольняє умові $U_0(x) \leq g(x, t_d)$ для всіх $x \geq 0$ при пошуку міні-

Нижні та верхні оцінки функціоналу $I_1(F_B)$

Зміна параметру t_d	$\inf_{F_B \in K_2} I_1(F_B)$	Точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$	$\sup_{F_B \in K_2} I_1(F_B)$	Точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$
$0 < t_d < s_1$	0	$x_1 = t_d,$ $x_2 = n,$ $n \rightarrow \infty$	$U_0(x) = 0$	$\frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}$	$x_1 = t_d,$ $x_2 = \frac{s_2 - s_1 t_d}{s_1 - t_d}$	$U_0(x) = \frac{(x - x_2)^2}{(t_d - x_2)^2}$
$s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{t_d - s_1}{t_d}$	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_d}$	1	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1$
$t_d \geq \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{(t_d - s_1)^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}$	$x_1 = \frac{s_1 t_d - s_2}{t_d - s_1},$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1 - \frac{(x - x_1)^2}{(t_d - x_1)^2}$	1	$x_1 = \frac{s_1 t_d - s_2}{t_d - s_1},$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1$

мального значення інтегралу (3.3) (або умові $U_0(x) \geq g(x, t_d)$ при пошуку максимального значення цього інтегралу). Коефіцієнти цього багаточлену $u_i, i = \overline{1, 3}$, визначаються з рівності $g(x, t_d) = U_0(x)$. Для наочності на рис. 1 та рис. 2 наведено графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) для різних областей зміни t_d (на осі виділено точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$). Ці графіки можуть бути доказом виконання умови $\underline{U}_0(x) \leq g(x, t_d)$ (при пошуку мінімального значення інтегралу (1)) або умови $\overline{U}_0(x) \geq g(x, t_d)$ (при пошуку максимального значення цього інтегралу).

Так, наприклад, в області $0 < t_d < s_1$ гранична функція розподілу $F_0(x)$ має точки росту $x_1 = t_d, x_2 = n, n \rightarrow \infty$, граничний багаточлен $U_0(x) = 0$, а мінімальне значення інтегралу (1) $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = 0$. При $s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}$ гранична функція розподілу має точки росту $x_1 = 0, x_2 = t_d$. Отже, рівняння граничного багаточлену $U_0(x)$ матиме вид $U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_d}$ (рис. 1). Мінімальне значення інтегралу (1) буде мати вид $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \frac{t_d - s_1}{t_d}$. Аналогічно доводиться решта результатів, представлені в табл. 1. Розглянемо ситуацію, коли випадкова величина t_b з функцією розподілу $F_B(x)$ не може приймати значень, більших t_b^* , тобто $0 < t_b \leq t_b^*$, де t_b^* – максимальний час відновлення, визначається умовами експлуатації об'єктів, кваліфікацією обслуговуючого персоналу та іншими факторами ($0 < t_b^* \leq \infty$). Нехай функція розподілу

$F_B(x) = P\{t_b < x\}$, як і раніше, невідома, а відомо лише, що вона належить класу K_2^* :

$$K_2^* = \left\{ F_B : F_B(0-) = 0; F_B(t_b^*+) = 1; \int_0^{t_b^*} x^i dF_B(x) = s_i, i = \overline{1, 2}; 0 < s_1^2 < s_2 < s_1 t_b^* \right\}.$$

В цьому випадку формули для двосторонніх оцінок функціоналу $I(F_B)$ приймає вид:

$$\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t_d \leq s_1, \\ 1 + \frac{s_2 - s_1(t_d + t_b^*)}{t_d t_b^*} & \text{при } s_1 < t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ \frac{(t_d + s_1)^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } t_d > \frac{s_2}{s_1}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sup_{F_B \in K_2} I_1(F_B) = \begin{cases} \frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ 1 - \frac{s_2 - s_1 t_d}{t_b^* (t_b^* - t_d)} & \text{при } s_1 \leq t_d < s_2/s_1, \\ 1 & \text{при } t_d \geq s_2/s_1. \end{cases} \quad (3)$$

Формули (2) та (3) справедливі $t_d < t_b^*$. Якщо інформація про функції розподілу $F_B(x)$ обмежена значенням тільки лише середнього значення

$$s_1 = \int_0^\infty [1 - F_B(x)] dx,$$

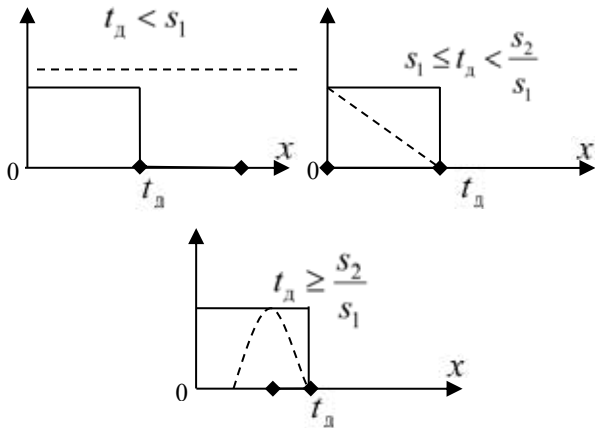


Рис. 1. Графіки зміни від функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку мінімального значення інтегралу (1)

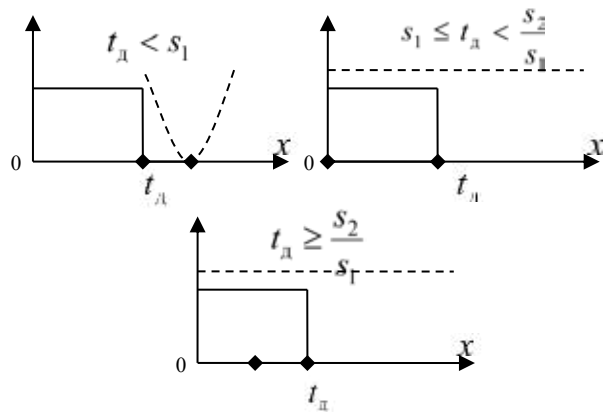


Рис. 2. Графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку максимального значення інтегралу (1)

тоді двосторонні оцінки функціоналу $I(F_b)$ мають вид:

$$\inf_{F_b \in K_2} I(F_b) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t_d \leq s_1, \\ \frac{t_d - s_1}{t_d} & \text{при } t_d > s_1, \end{cases}$$

$\sup_{F_b \in K_2} I(F_b) = 1$ при всіх можливих співвідношеннях s_1 і t_d .

Таким чином, отримані результати реалізації перших двох етапів запропонованої удосконаленої методики – нижня та верхня границі базових функціонала $I(F_b)$ (формула (1)), які дають можливість отримати двосторонні показники надійності функціонування КО з комбінованим резервом часу в умовах апіорної невизначеності.

Висновки. Запропоновано удосконалену методику побудови двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) показників надійності КО з комбінованим резервом часу, в основі якої покладено використання математичних моделей оцінки надійності, отриманих при повній вихідній інформації. Сутність удосконалення методики, що визначає її новизну та відмінність від відомих, полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов та збоїв на надійність функціонування та входить у формули для показників надійності КО з комбінованим резервом часу, і побудові нижньої та верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності КО шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

Список літератури:

1. Креденцер Б.П., Вишнівський В.В., Жердев М.К., Могилевич Д.І. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 336 с.
2. Yakovyna V.S., Seniv M.M., Symets I.I. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020, vol. 4. P. 163–177. DOI:10.15588/1607-3274-2020-4-16
3. Яковина В., Мацелюх В. Огляд і аналіз моделей надійності програмного забезпечення. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2017. № 771. С. 130–140. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPKNIT_2013_771_17.
4. Zhong W., Wang L., Liu Z., Hou S. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 111–123. DOI:10.35833/MPCE/2018.000666.
5. Kaner C., Falk J., Hung Q. Nguyen Testing computer software. *John Wiley and Sons*. 1999. 496 p. URL: <https://anyflip.com/ulhe/svme/basic/51-81>.
6. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *SN Appl*. 2021. Vol. 18. DOI:10.1007/s42452-020-04015-z.
7. Mogylevych D.I. Kononova I.V. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication*

Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer. 2018. Vol. 560. P. 101–117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.

8. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. *Information Technology and Security*. 2022. Vol. 10. P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132>.

9. Mogylevych D., Kredentser B., Kononova I., Mohylevych V. Analytical Model with Interruption of Service of Short-term Objects with Temporary Reservation. *IT&I-2020 Information Technology and Interactions*. 2020. P. 295 – 307. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_28.pdf.

Tykhonov M.V., Kononova I.V. AN IMPROVED METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING BILATERAL RELIABILITY ESTIMATES OF COMMUNICATION DEVICES WITH A COMBINED TIME RESERVE

Assessment of reliability indicators of complex technical systems, which include communication equipment of modern communication networks, at the stages of creation and operation is usually carried out under conditions of a priori uncertainty of the initial data. The presence of uncertainty (incompleteness, unreliability) of the initial information when solving problems of assessing the reliability of communication equipment is due to the fact that in many cases it is not possible to obtain a sufficiently large sample size of random variables characterizing the reliability, maintainability and operation of the system under study.

The subject of the theoretical study is the processes of functioning of communication equipment in conditions of limited reliability of software. The aim of the work is to develop an improved methodology for constructing bilateral estimates (lower and upper limits) of the reliability indicators of the functioning of communication equipment with a combined time reserve with limited initial information. An improved methodology is proposed, based on the use of mathematical models for assessing reliability obtained with complete initial information. The essence of improving the methodology, which determines its novelty and difference from the known ones, is to select a new basic functionality that characterizes the impact of failures and failures on the reliability of operation and is included in the formulas for reliability indicators of communication equipment with a combined time reserve, and to build the lower and upper limits of this functionality with the subsequent obtaining of two-sided estimates of the reliability of communication equipment by substituting the boundary values of the basic functionality.

The improved methodology makes it possible to build new mathematical models of reliability, theoretical study of which allows for a comprehensive assessment of the reliability of communication equipment with joint consideration of the replenishable and non-replenishable components of the combined time reserve, various types of failures and failures and their consequences.

Key words: *software, reliability indicators, failures, failures, communication equipment, combined time reserve.*