

МЕТОД ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Оцінка надійності телекомунікаційних систем, які відносяться до класу складних технічних систем, на етапах створення і експлуатації здійснюється в умови відсутності або наявності неповної інформації про закони розподілу випадкових величин, які характеризують надійність елементів, складових частин або системи в цілому, а також процес її функціонування.

Широке використання у складі сучасного телекомунікаційного обладнання обчислювальних елементів та застосування спеціалізованого (прикладного) програмного забезпечення призвело до виникнення нових джерел відмов – збоїв у роботі протоколів маршрутизації та програмному забезпеченні обладнання, які суттєво впливають на показники надійності.

В статті обґрунтовано метод оцінки надійності телекомунікаційного обладнання з урахуванням відмов та збоїв в умовах обмеженої вихідної інформації. В основі методу лежить вибір нових базових функціоналів, які характеризують вплив на надійність телекомунікаційного обладнання збоїв і відмов, що дозволяє будувати аналітичні моделі для двосторонніх оцінок показників надійності обладнання.

Ключові слова: телекомунікаційна система, показники надійності, апріорна невизначеність, відмова, збій.

Кононова І.В. Метод построения двусторонних оценок показателей надежности оборудования телекоммуникационных систем в условиях априорной неопределенности исходных данных. Оценка надежности телекоммуникационных систем, которые относятся к классу сложных технических систем, на этапах создания и эксплуатации осуществляется в условия отсутствия или наличия неполной информации о законах распределения случайных величин, которые характеризуют надежность элементов, составных частей или системы в целом, а также процесс ее функционирования.

Широкое использование в составе современного телекоммуникационного оборудования вычислительных элементов и применения специализированного (прикладного) программного обеспечения привело к возникновению новых источников отказов – сбоев в работе протоколов маршрутизации и программном обеспечении оборудования, которые существенно влияют на показатели надежности.

В статье обоснован метод оценки надежности телекоммуникационного оборудования с учетом отказов и сбоев в условиях ограниченной исходной информации. В основе метода лежит выбор новых базовых функционалов, характеризующих влияние на надежность телекоммуникационного оборудования сбоев и отказов, позволяет строить аналитические модели для двусторонних оценок показателей надежности оборудования.

Ключевые слова: телекоммуникационная система, показатели надежности, априорная неопределенность, отказ, сбой.

I.Kononova A method of constructing two-sided estimates of the reliability of telecommunication systems equipment under the a priori uncertainty of the raw data. Reliability assessment of telecommunication systems, which belong to the class of complex technical systems, at the stages of creation and operation is carried out in the absence or presence of incomplete information on the laws of distribution of random variables that characterize the reliability of elements, components or the whole system, as well as the process of its functioning.

The widespread use of computing elements in the composition of modern telecommunication equipment and the use of specialized (application) software led to the emergence of new sources of failure – malfunctions in the routing protocols and equipment software, which significantly affect reliability indicators.

The article substantiates a method for assessing the reliability of telecommunication equipment, taking into account failures and refusals in conditions of limited initial information. The method is based on the selection of new basic functionalities characterizing the impact of failures and refusals on the reliability of telecommunication equipment, and it allows building analytical models for two-sided estimates of equipment reliability indicators.

Key words: telecommunication system, reliability indicators, a priori uncertainty, failure, refusals.

Постановка завдання. В останні роки з'явився ряд публікацій вітчизняних та зарубіжних спеціалістів в галузі надійності мереж та систем зв'язку, зокрема, телекомунікаційних мереж (ТКМ), у яких наводяться результати аналізу стану справ у даній предметній сфері [1 – 4]. Ці роботи містять гостру та обґрунтовану, на мій 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.

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

Слід відмітити два важливі фактори, урахування яких при дослідженні надійності ТКМ викликає серйозні труднощі: „априорна невизначеність” та збої. Під терміном „априорна 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 ступеня 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 ТКМ з точки зору надійності є те, що в них з'являється нове джерело відмов – збої в роботі протоколів маршрутизаторів (до 17 % від загального числа відмов), збої у електроживленні (16 %), а також збої оптичного обладнання, які обумовлюють 84 % відмов в транспортних мережах [5, 6]. Кожна відмова (збій) у телекомунікаційній мережі веде до припинення інформаційного обміну на десятки секунд, що викликає втрати гігабіт даних і, як слідство, суттєво знижує готовність мережі.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз показав, що переважну більшість результатів оцінки надійності об'єктів радіоелектронної техніки, і зокрема, телекомунікаційного обладнання ТКМ отримано при допущенні про наявність повної вихідної інформації, щодо досліджуваних процесів функціонування без урахування збоїв (враховувались лише стійкі відмови обладнання) [7 – 9].

Метою даної статті є розробка аналітичного методу оцінки надійності телекомунікаційного обладнання ТКМ 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].

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.

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 і т.д., тобто функція $g(x)$ піддається аналітичному дослідженню. Тому в даній статті запропоновано аналітичний метод побудови двосторонніх оцінок показників надійності, в основі якого лежить вказана вище особливість. В роботах Л.С. Стойкової під керівництвом академіка І.М. Коваленко обґрунтовано аналітичний підхід щодо вирішення задачі знаходження екстремальних функцій розподілу для розрахунку нижніх та верхніх границь функціоналів (1) і (2) та розроблені математичні основи цього підходу [10]. Але, 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 академіка І. Н. Коваленко, 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.

Побудова двосторонніх оцінок функціоналів, що характеризують надійність.

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:

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

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

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

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.

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 багаточлен $U_0 = u_1 + u_2x + u_3x^2$ 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 багаточлена $u_i, i = \overline{1,3}$, визначаються з рівності $g(x_i, t_d) = U_0(x_i)$, $i = \overline{1,3}$.

Нижні та верхні оцінки функціонала $I_1(F_{\Pi})$ представлені в табл. 1 [11].

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

Зміна параметра t_d	$\inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$	Точки росту граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$	$\sup_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi})$	Точки росту 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	$x_1 = \frac{s_1 t_d - s_2}{t_d - s_1},$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1$

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 $0 < t_d < s_1$ та $t_d > \frac{s_2}{s_1}$ і верхні оцінки в областях $0 < t_d < s_1$ і $t_d > \frac{s_2}{s_1}$ збігаються з наведеними в табл. 1.

При $s_1 < t_d \leq \frac{s_2}{s_1}$ найменше значення

$$\inf_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi}) = \frac{s_2 - s_1(t_d + Q) + t_d Q}{t_d Q}, \quad (6)$$

а найбільше

$$\sup_{F_{\Pi} \in K_2} I_1(F_{\Pi}) = 1 - \frac{(s_2 - s_1 t_d)}{Q(Q - t_d)}, \quad (7)$$

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 $t_d = \text{const}$ та наявності інформації тільки про математичне очікування s_1 і дисперсію $\sigma^2 = s_2 - s_1^2$ часу підключення резерву.

Розглянемо тепер функціонал $I_2(F_B)$ (формула (4)), що залежить від функції розподілу $F_B(x)$, який входить у формули для показників надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання, що містять $m \geq 1$ резервних елементів, отриманими при повній вихідній інформації. Обмежимося розглядом двох крайніх випадків: обмеженого ($l=1$) або необмеженого ($l=m$) відновлення елементів, що відмовили, у ремонтному органі [12]. 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

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

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 $K_r(t_d)$) та коефіцієнта оперативної готовності $P_{ог}(t, t_d)$ при повній вихідній інформації, в які входять функціонали $I_1(F_{\Pi})$ і $I_2(F_B)$ [11]:

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

$$P(t, t_d) = \exp \left[-\frac{t}{T_0}(t_d) \right]; \quad (10)$$

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

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

$$P_{ог}(t, t_d) = K_{г}(t_d) \exp \left[-\frac{t}{T_0}(t_d) \right]. \quad (13)$$

У формулах (9–13) прийняті наступні позначення: $k_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda}$; $\rho = \lambda\beta_1$; $x = \frac{\beta_m}{\beta_1}$ при $l = 1$;

$$x = 1 \text{ при } l \geq m; \quad q = 1 - F_{п}(t_d) = P\{t_{п} > t_d\}; \quad q_1 = \frac{x\rho^m}{m!} \prod_{i=0}^m (n + i\alpha); \quad q_2 = \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{(n+m)\lambda + \lambda_3};$$

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

$$T_{п}^*(t_d) = \frac{\int_0^{\infty} x dF_{п}(x)}{1 - F_{п}(t_d)} - t_d = I_3(F_{п}). \quad (15)$$

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

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

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

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

$$q_* = 1 - \sup_{F_{п} \in K_2} I_1(F_{п});$$

$$q^* = 1 - \inf_{F_{п} \in K_2} I_1(F_{п}).$$

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

$\max_{F_{п} \in K_2} T_0(t_d)$) отримаємо після підстановки граничних значень (q_* і q^*) функціоналу q

(табл. 2) в формулу (9):

для навантаженого резерву

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

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

Граничні значення функціоналу q

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

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

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

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

для ненавантаженого резерву

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

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

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

$$\min_{F_n \in K_2} P(t, t_d) = \exp \left(- \frac{t}{\min_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right), \quad (24)$$

$$\max_{F_n \in K_2} P(t, t_d) = \exp \left(- \frac{t}{\max_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right); \quad (25)$$

$$\min_{F_n \in K_2} T_B(t_d) = \frac{1}{q_1 + \bar{q}_2} [q_1 T_B^* + \bar{q}_2 \bar{T}_\Pi^*(t_d)], \quad (26)$$

$$\max_{F_n \in K_2} T_B(t_d) = \frac{1}{q_1 + \underline{q}_2} [q_1 T_B^* + \underline{q}_2 \bar{T}_\Pi^*(t_d)]; \quad (27)$$

$$\min_{F_n \in K_2} K_\Gamma(t_d) = \left[1 + \frac{\max_{F_n \in K_2} T_B(t_d)}{\min_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right]^{-1}, \quad (28)$$

$$\max_{F_n \in K_2} K_r(t_d) = \left[1 + \frac{\min_{F_n \in K_2} T_B(t_d)}{\max_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right]^{-1}; \quad (29)$$

$$\min_{F_n \in K_2} P_{ог}(t, t_d) = \min_{F_n \in K_2} K_r(t_d) \exp \left[-\frac{t}{\min_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right], \quad (30)$$

$$\max_{F_n \in K_2} P_{ог}(t, t_d) = \max_{F_n \in K_2} K_r(t_d) \exp \left[-\frac{t}{\max_{F_n \in K_2} T_0(t_d)} \right]. \quad (31)$$

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

$$\bar{T}_n^*(t_d) = \frac{q_*(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3}; \quad \bar{T}_n^*(t_d) = \frac{q^*(n\lambda + \lambda_3)}{(n+m)\lambda + \lambda_3}, \quad (32)$$

де q_* і q^* наведено в табл. 2.

Числовий приклад. Розглянемо пристрій комутації, який широко застосовується у телекомунікаційній мережі.

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:

$$\lambda = 10^{-4} \text{ 1/год}; \quad \bar{t}_B = \beta_1 = 24 \text{ год}; \quad \beta = 800 \text{ год}^2; \quad l = 1; \quad \bar{t}_n = s_1 = 10 \text{ с}; \quad s_2 = 120 \text{ с}; \quad t_d = 8 \text{ с};$$

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

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			
	$T_0(t_d)$, год	$P(t, t_d)$	$T_B(t_d)$, год	$P_{ог}(t, t_d)$
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 оцінок показників надійності телекомунікаційного обладнання телекомунікаційної мережі 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 мереж зв'язку одним з важливих напрямків повинно бути обґрунтування ефективних методів зменшення інтенсивності збоїв та їх впливу на процеси функціонування цього класу складних інформаційно-розрахункових

систем. Напрямок подальших досліджень є обґрунтування шляхів та методів зменшення інтенсивності збоїв у існуючому та перспективному телекомунікаційному обладнанні, а також розробка ефективних способів нейтралізації наслідків їх впливу на процес функціонування обладнання телекомунікаційних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нетес В.А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN / Нетес В.А. // Вестник связи. – 2007. – № 9. – С. 126 – 130.
2. Duffy J. Cisco routers caused major outage in Japan: report / Duffy J. // Network World. – December 2007. – P. 25 – 27.
3. Availability and Robustness of Electronic Communications Infrastructures / «The ARECI Study»: Final Report // European Commission. March, 2007. – P. 13 – 19.
4. Tortorella M. Reliability engineering challenges of converged networks and packet-based services: Rutgers' Industrial Engineering Working Paper / Tortorella M. February 5, 2003. – P. 43 – 47.
5. Markopoulo A. Characterization of failures in an operational IP backbone network / Markopoulo A., Iannaccone G., Bhattacharya S., Chua C., Ganjali Y., Diot C. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2008. – vol. 16. – № 4. – P. 749 – 763.
6. Labovitz C. Experimental study of internet stability and backbone failures / Labovitz C., Ahuja A., Jahanian F. // Proc. The 29-th International Symposium on Fault-Tolerant
7. Вопросы математической теории надежности / Бразилевич Е.Ю., Беляев Ю.К., Каштанов В.А. и др. // Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376с.
8. Надежность технических систем: Справочник / Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.П. и др. / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608с.
9. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: Монографія / [Креденцер Б.П., Міночкін А.І., Могилевич Д.І.]. – К.: „Фенікс”, 2013. – 342с.
10. Стойкова Л.С. Дослідження узагальнених нерівностей Чебишева з застосуванням до математичної теорії надійності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора фіз.-мат. наук: спец. 01.05.01 „Теоретичні основи інформатики та кібернетики (математична кібернетика)” / Л.С. Стойкова – Київ, 1995. – 28 с.
11. Креденцер Б.П. Оценка эксплуатационно-технических характеристик объектов телекоммуникаций при априорной неопределенности: монография / Креденцер Б.П., Могилевич Д.И. Миночкин А.И. – К.: „Фенікс”, 2012. – 332 с.
12. Кононова І.В., Креденцер Б.П., Могилевич Д.І. Урахування збоїв при оцінці надійності телекомунікаційного обладнання з часовим резервуванням. – К.: НАУ, 2018. – С. 60 – 68.