

ТИХОНОВ МИКОЛА

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0009-0004-3736-47614>e-mail: tichonov@ukr.net

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З КОМБІНОВАНИМ РЕЗЕРВОМ ЧАСУ

Стаття присвячена удосконаленню науково-методичного апарату комплексної оцінки показників надійності електронного комунікаційного обладнання сучасних електронних комунікаційних мереж.

Визначено, що об'єктом теоретичного дослідження є процеси функціонування електронного комунікаційного обладнання в умовах обмеженої надійності програмних засобів. Удосконалений метод призначено для побудови моделей оцінки показників надійності електронного комунікаційного обладнання з різними типами відмов та комбінованим резервом часу.

Сформульовано вихідні передумови, обмеження та допущення, при яких вирішується задача побудови моделей оцінки надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. Для досягнення мети дослідження запропоновано декомпозицію загальної математичної моделі функціонування системи з комбінованим часовим резервом на дві взаємопов'язані, але простіші моделі, що аналізуються окремо. Перша – модель регенеруючого випадкового процесу – використовується для перевірки дотримання часового обмеження, визначеного поповнюваною складовою. Її результати застосовуються у другій моделі, що представлена тривимірним марківським процесом спеціального виду, який дозволяє врахувати вплив непоповнюваної складовою комбінованого резерву. Запропонований підхід дозволяє отримати нові розрахункові формули для комплексної оцінки надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу, враховуючи різні типи відмов. Це дозволяє більш точно оцінити показники надійності електронного комунікаційного обладнання та розробити заходи щодо їхнього підвищення.

Ключові слова: надійність, мережа зв'язку, електронне комунікаційне обладнання, відмова, експлуатаційні параметри, резервування, ефективність.

TYKHONOV MYKOLA

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

IMPROVED METHOD FOR CONSTRUCTING MODELS FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE OPERATION OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT OBJECTS WITH COMBINED TIME RESERVE

The article is devoted to improving the scientific and methodological apparatus for the comprehensive assessment of reliability indicators of electronic communication equipment in modern communication networks. It is determined that the object of theoretical research is the processes of functioning of electronic communication equipment in conditions of limited reliability of software tools. The improved method is intended to build models for assessing electronic communication equipment reliability indicators with different types of failures and a combined time reserve. The initial preconditions, constraints, and assumptions are formulated, under which the problem of constructing models to assess the reliability of electronic communication equipment with a combined time reserve is solved. To achieve the study's goal, it is proposed that the general mathematical model of the functioning of a system with a combined time reserve be decomposed into two interconnected but simpler models that are analysed separately. The first – a model of a regenerating random process – is used to check compliance with the time constraint defined by the replenishable component. Its results are applied in the second model, represented by a three-dimensional Markov process of a special type, which allows the influence of the non-replenishable component of the combined reserve to be considered. The proposed approach allows obtaining new calculation formulas for a comprehensive assessment of the reliability of electronic communication equipment with a combined time reserve, taking into account various types of failures. This allows a more accurate assessment of the reliability indicators of electronic communication equipment and the development of measures to improve them.

Keywords: reliability, communication network, electronic communication equipment, failure, operational parameters, redundancy, efficiency.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В умовах зростаючої залежності суспільства від електронних комунікацій, забезпечення надійності мереж стає одним з найважливіших завдань. Незважаючи на те, що до цього часу якість елементної бази суттєво підвищилась, все ж ріст складності сучасного електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) випереджає темпи безвідмовності елементів, що не завжди дозволяє забезпечити високу (або) задану надійність функціонування системи в цілому. Введення і використання надлишковості – необхідна умова забезпечення нормального функціонування ЕКО в умовах впливу внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів. Часове резервування один із видів надлишковості, на відміну від інших видів (структурної, навантажувальної та інших), використовує в якості резерву час.

Системи з комбінованим резервом часу утворюють великий клас систем, в яких резерв часу може створюватися по-різному. В одних випадках він утворюється за рахунок додаткового збільшення часу для виконання системою завдання, в інших – шляхом використання запасу продуктивності об'єкта. Ефективність часового резервування визначається взаємодією джерел комбінованого резерву часу.

Таким чином, виникає потреба в удосконаленні науково-методичного апарату побудови моделей

(аналітичних співвідношень, що встановлюють зв'язок між показниками надійності ЕКО, характеристиками відмов та їх наслідків і параметрами процесу функціонування обладнання) комплексної оцінки надійності функціонування електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз відомих робіт в даній предметній галузі показує, що для розв'язання задач оцінки показників надійності системи з часовою надлишковістю найчастіше використовують методи напівмарківських або багатомірних марківських процесів, а також інтегральний і диференціальний методи [1 – 4]. Сутність останніх двох методів полягає у зіставленні та наступному розв'язанні систем відповідно інтегральних або диференціальних рівнянь відносно ймовірності безвідмовного функціонування систем з резервом часу із використанням операційного перетворення Лапласа-Стільтєса. Однак при такому підході при виконанні зворотнього перетворення з метою отримання оригіналів точних формул для показників надійності зустрічаються серйозні труднощі. У зв'язку з цим виникає потреба в удосконаленні науково-методичного апарату на основі якого можна комплексно проводити оцінку показників надійності ЕКО.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є удосконалення науково-методичного апарату комплексної оцінки показників надійності електронного комунікаційного обладнання.

Виклад основного матеріалу

Сформулюємо вихідні передумови, обмеження та допущення, при яких будемо вирішувати задачу побудови моделей оцінки надійності об'єктів ТЛКО з комбінованим резервом часу, функціонування яких здійснюється у відповідності з розглянутою у [5] моделлю.

Нехай в об'єкті виникають відмови та збої технічних та програмних засобів i типів ($i \geq 1$), які можуть призводити до затримки виконання завдання тривалістю $t_z = \text{const}$. Позначимо через $F_i(t) = P\{t_{0i} < t\}$ і $F_{ei}(t) = P\{t_{ei} < t\}$ – функції розподілу відповідно напрацювання об'єкта до відмови t_{0i} і часу відновлення t_{ei} , $i \geq 1$. Неважко побачити, що напрацювання об'єкта до будь якої відмови – випадкова величина t_0 з функцією розподілу

$$F_0(t) = P\{t_0 < t\} = 1 - \prod_{i \geq 1} [1 - F_i(t)].$$

Будемо вважати, що напрацювання об'єкта до відмови t_{0i} і час відновлення працездатності t_{ei} при відмовах i -го типу ($i \geq 1$) – взаємонезалежні випадкові величини з відомими або заданими функціями розподілу, які мають кінцеві математичні очікування. Відносно поведінки об'єкта після відновлення працездатності приймемо наступні допущення: в момент закінчення ремонту об'єкт з ймовірністю p_i , $0 \leq p_i \leq 1$ продовжує виконувати завдання з урахуванням попереднього напрацювання (при незнецінюючій відмові) або ймовірністю $1 - p_i$ приступає до виконання завдання з самого початку після відновлення об'єкта (при знецінюючих відмовах). Внаслідок затримок, обумовлених виникненням та усуненням відмов, реальний час виконання завдання стає випадковою величиною $T_{вз}$ з невідомою функцією розподілу.

В об'єкті використовується комбінований резерв часу (t_0, t_p) з заданими значеннями поповнюваної t_0 і непоповнюваної t_p складових резерву. Взаємодія цих складових t_0 і t_p здійснюється у відповідності з функціонуванням об'єкта при незнецінюючих і знецінюючих відмовах. Відмова (зрив функціонування) розглядаємої системи об'єкт-час (ОЧ) [6] виникає при виконанні умови $T_{нп}(t_z) > t_p$ в момент витрачення непоповнюваної складової резерву часу $t_p = 0$ (тут $T_{нп}(t_z)$ – сумарний непродуктивний час).

При теоретичному дослідженні даної системи ОЧ приймемо наступні обмеження та допущення:

1. Контроль працездатності об'єкта повний, неперервний та достовірний, що дозволяє виявити відмови об'єкта будь-якого типу в момент їх виникнення;
2. Напрацювання між сусідніми відмовами розподілена за тим же законом $F(t)$, що і напрацювання до першої відмови;
3. Ремонт повністю відновлює вихідні властивості об'єкта і після його закінчення негайно відновлюється виконання завдання;
4. Кількість відновлень працездатності в оперативному інтервалі часу не обмежується, при цьому час відновлення t_v не залежить від кількості відмов в минулому і розподіляється за законом $F_v(t)$.

Для прийнятих вихідних умов необхідно отримати модель оцінки надійності – розрахункові співвідношення для основних показників надійності системи ОЧ з комбінованим резервом часу.

Аналіз сучасних досліджень [7–11] показав, що для отримання наближених формул, прийнятих для використання в інженерній практиці, доцільно вводити деякі спрощуючі умови. Саме цей шлях ми обираємо для обґрунтування найбільш ефективного методу вирішення сформульованої задачі. На першому етапі перевірки часових обмежень при використанні поповнюваної складової t_0 комбінованого резерву часу проявляється ефект розрідження вихідного потоку відмов, який не тільки поліпшує показники безвідмовності, але і призводить до зміни виду вихідних функцій розподілу $F(t)$ напрацювання об'єкта до відмови t_0 . Остання обставина буде використана нами при побудові моделі

функціонування об'єкта з непоповнюваним резервом часу t_p на другому етапі розв'язання задачі.

Для об'єкта з поповнюваним резервом часу t_0 отримана точна формула для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, t_0)$ при експоненціальному розподілі напрацювання до відмови $F(t)$ з параметром λ і часом відновлення $F_0(t)$ з параметром μ [12], однак вона занадто громіздка й мало придатна для використання в практичних розрахунках і тут не приводиться. Цю формулу доцільно використовувати при оцінці похибки наближених, але більш простих розрахункових співвідношень, що ми отримаємо при довільних розподілах $F(t)$ і $F_0(t)$ за умови $\bar{t}_0 \ll \bar{t}_0$, яка, як правило, виконується в сучасних відновлюваних об'єктах. При цьому можна знехтувати відрізками часу $t_0 < t_0$ і отримати для ймовірності $P(t, t_0)$ наближену формулу. Покажемо це.

Позначимо через $P\{A_n\} = P\{\sum_{i=1}^n t_{ni} < t, t_{ei} < t_0, \dots, t_{e(n-1)} < t_0, t_{en} < t_0\}$, $t > t_0$, ймовірність події A_n , полягає в наступному: момент n -ї відмови об'єкта не перевищує за величиною момент закінчення оперативного часу t ; $(n-1)$ відновлень об'єкта відбувається за час, менший t_0 (тобто $t_{ei} < t_0, i = \overline{1, n-1}$); n -й ремонт виявився тривалим ($t_{en} < t_0$), тобто після закінчення часу t_0 після його початку n -а відмова об'єкта перейшла у відмову системи. Використовуючи формулу повної ймовірності, запишемо:

$$P(t, t_0) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\{A_n\} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\left\{\sum_{i=1}^n t_{ni} < t; t_{bj} < t_0, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} < t_0\right\} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\left\{t_{bj} < t_0, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} > t_0\right\} \times \\ \times P\left\{\sum_{i=1}^n t_{ni} < t/t_{bj} < t_0, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} > t_0\right\} = 1 - q \sum_{n=0}^{\infty} (1-q)^n F_{n+1}(t), t > t_0, \quad (1)$$

де $F_{n+1}(t) = P\{\sum_{i=1}^{n+1} t_{ni} < t\} - (n+1) -$ кратна згортка функції розподілу $F(t)$ (при $n=0$ маємо $F_1(t) = F(t)$); q – ймовірність того, що відмова об'єкта перейде в відмову системи, тобто

$$q = P\{t_0 > t_0\} = 1 - F_0(t_0). \quad (2)$$

Для деяких розподілів $F(t)$ можна виписати формули для згортки $F_{n+1}(t)$, що входить в (1), в явному виді. Зокрема, для експоненціального розподілу $F(t)$ з параметром $\lambda = 1/\bar{t}_0$ маємо

$$F_{n+1}(t) = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

для нормального розподілу $F(t)$ (параметри $\bar{t}_0$ і σ_0 , причому $\bar{t} \gg \sigma_0$)

$$F_{n+1}(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - (n+1)\bar{t}_0}{\sigma_0 \sqrt{n+1}}\right), \quad (4)$$

при розподілі Ерланга k -го порядку (параметра λ і k)

$$F_{n+1}(t) = 1 - \sum_{i=0}^{(n+1)k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

Підставляючи вирази (3) – (5) в (1), отримуємо розрахункові співвідношення для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, t_0)$. Зокрема, після підстановки (3) в (1) і ряду перетворень маємо

$$P(t, t_0) = \begin{cases} 1, & t \leq t_0, \\ \exp[-\lambda(t - t_0)(1 - F_0(t_0))], & t > t_0. \end{cases} \quad (6)$$

Порівняння результатів розрахунку за точною [5] і наближеною (6) формулам показує, що похибка отриманої наближеної формули цілком прийнятна для інженерної практики вже при порівняно невеликих значеннях відношення $\frac{\bar{t}_0}{t_0}$ і швидко спадає з його зменшенням. Так, при $\frac{\bar{t}_0}{t_0} = 0,1$, і $t = 3t_0$ відносна помилка формули (6) складає 2,9 %, якщо $\mu t_0 = 1$, і 6,5 %, якщо $\mu t_0 = 3$, а при $\frac{\bar{t}_0}{t_0} = 0,05$ вона дорівнює 0,55 % і 1,4 % відповідно для $\mu t_0 = 1$ і $\mu t_0 = 3$. При цьому формула (6) має хорошу точність не тільки при великих значеннях λt , але і при λt , сумірних з λt_0 .

При великих значеннях t доцільно користуватися наближеними (асимптотичними), але більш простими виразами. Наведемо один з таких виразів для поширеного в інженерній практиці випадку $\bar{t}_0 < \bar{t}_0$ і довільних розподілів $F(t)$ та $F_0(t)$ випадкових величин t_0 і t_0 .

Неважко побачити, що процес функціонування об'єкта з поповнюваним резервом часу t_0 добре описується моделлю регенеруючого процесу [10], якщо знехтувати часом відновлення працездатності об'єкту (оскільки $\bar{t}_0 \ll \bar{t}_0$) і рідкісна подія A на кожному періоді регенерації (у нашому випадку t_0) розглядати як виконання нерівності $t_0 > t_0$. Позначимо через α наступний вираз:

$$\alpha = \frac{M t_0^2}{\bar{t}^2} q = \left[\int_0^{\infty} x^2 dF(x) \right] \left[\int_0^{\infty} x dF(x) \right]^{-2} q,$$

де q – ймовірність здійснення події A при кожній відмові і наступному ремонті об'єкта (формула (2)). Тоді при сформульованих вище умовах справедлива наступна асимптотична формула:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} P\left\{\frac{q T_0(t_0)}{\bar{t}_0} > x\right\} = e^{-x},$$

яка означає, що при малих значеннях α (ймовірність q мала) для розрахунку ймовірності безвідмовного функціонування об'єкта з поповнюваним резервом часу $P(t, t_0)$ може бути використано наближений вираз:

$$P(t, t_0) \approx \begin{cases} 1, & t \leq t_0, \\ \exp\left[-\frac{q(t-t_0)}{\bar{t}_0}\right], & t \geq t_0. \end{cases} \quad (7)$$

який справедливий при довільних законах розподілу $F(t)$ напрацювання об'єкта до відмови t_0 і $F_6(t)$ часу відновлення t_6 . При експоненціальному розподілі $F(t)$ з параметром $\lambda = \frac{1}{\bar{t}_0}$ формули (7) і (6) співпадають.

Оцінимо значення малого параметра (ймовірність q), при яких відносна похибка наближених (асимптотичних) формул (7) не перевищує заданих величин. В якості точних використовуємо вираз (1) при нормальному розподілі $F(t)$ і $\frac{\bar{t}_6}{\bar{t}_0} \geq 0,01$ (при цьому точність даного виразу достатньо висока). З рис. 1 видно, що відносна похибка δ не перевищує 5% при $q \leq 0,2$ в широкому діапазоні зміни інтервалу оперативного часу t . Зі збільшенням часу t похибка δ помітно зменшується і досягає значень від декількох процентів до часток проценту при $q \leq 0,3$ і $t \geq 0,5 \frac{\bar{t}_0}{q}$.

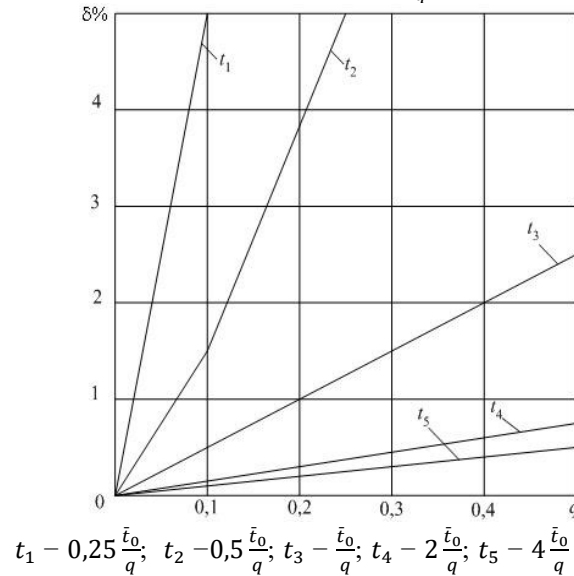


Рис. 1. Залежність відносної похибки наближеної формули для $Q(t, t_0) = 1 - P(t, t_0)$ від величини малого параметру q та інтервалу оперативного часу t

Таким чином, після першого етапу перевірки часових обмежень і при виконанні деяких умов (при $\bar{t}_6 \ll \bar{t}_0$ і ймовірності відмови об'єкта з поповнюваним резервом часу $q = 1 - F_6(t_0) < 0,2$) розподіл напрацювання об'єкта до відмови вельми близько до експоненціального розподілу з параметром λq (формули (6), (7)). Використовуючи цей результат, можна далі звести розв'язання сформульованої задачі до побудови моделі оцінки надійності системи з непоповнюваним резервом часу t_p при виникненні відмов об'єкта i -го типу з інтенсивністю $\lambda_i q_i (i \geq 1)$ з наступною перевіркою похибки отриманих розрахункових формул.

Такий підхід, що дозволяє уникнути необхідності побудови громіздкої загальної математичної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу, дає можливість спростити розв'язання сформульованої задачі та отримати наближені формули для показників надійності, придатні для використання в інженерній практиці.

Розглянемо математичну модель процесу функціонування системи з непоповнюваним резервом часу t_p і різними типами відмов об'єкта, яка дозволить реалізувати вказаний вище підхід на другому етапі перевірки часових обмежень. Нехай $F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i q_i)$ і $F_{6i}(t) = P\{t_{6i} \leq t\}$ ($i \geq 1$) – функція розподілу відповідно напрацювання об'єкта до відмови i -го типу і часу відновлення працездатності ($q_i = 1 - F_i(t_0)$). Очевидно, що напрацювання об'єкта до будь-якої відмови – випадкова величина з функцією розподілу

$$F_0(t) = P\{t_0 \leq t\} = 1 - \prod_{i \geq 1} [1 - F_i(t)] = 1 - \exp(-\sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i).$$

Позначимо через t_{2j-1} і t_{2j} ($j \geq 1$) моменти відповідно j -го за рахунком відмови об'єкта і закінчення його відновлення. Припустимо, що $t_0 = 0$, $\tau_n = t_n - t_{n-1}$, $n = 1, 2, \dots$, і нехай τ_n взаємно незалежні. Очевидно, t_{2j-1} для всіх $j \geq 1$ мають функцію розподілу $F_0(t)$.

Поставимо у відповідність процесу функціонування об'єкта випадковий процес $\zeta(t)$, який побудуємо наступним чином. Процес $\zeta(t) = 0$, якщо в момент t об'єкт вільний (завдання відсутні), лінійно зростає на відрізках часу $[t_{2j-2}, t_{2j-1}]$, постійний в інтервалах $[t_{2j-1}, t_{2j}]$, а в моменти t_{2j} ($j \geq 1$) з ймовірністю $(1 - p_i)$ здійснює стрибок в 0 або з ймовірністю p_i продовжує лінійно зростати.

Для описання процесу функціонування об'єкта, який розглядається, очевидно, достатньо задати розподіли проміжків часу, протягом яких він вільний, і дисципліну появи завдань різних типів та

розглянути підпроцес (позначимо його $\zeta^*(t)$), що обривається в момент $t_{вз}$ першого досягнення рівня t_3 . Підпроцес $\zeta^*(t)$ повністю описує виконання одного завдання, яке в ідеальних умовах має тривалість t_3 . Тому в подальшому обмежимося розглядом випадкового процесу $\zeta(t) \in [0, \infty)$, який співпадає на відрізку $[0, t_{вз}]$ з підпроцесом $\zeta^*(t)$, але в момент $t_{вз}$ не обривається, а продовжує еволюціонувати за тим же законом, що і до моменту $t_{вз}$ (рис. 2, а).

Відмітимо, що $\zeta(t)$ не є марківським процесом, проте його можна перетворити в марківський за допомогою введення додаткових координат, тобто шляхом включення вихідного процесу $\zeta(t)$ у більш складний марківський процес. Введемо випадкові процеси

$$\eta(t) = t - \sup\{t_n: n \geq 0, t_n \leq t\}, \quad \xi(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t_{2j-2} \leq t \leq t_{2j-1}, \\ i, & \text{якщо } t_{2j-1} \leq t \leq t_{2j}, \quad j \geq 1, \end{cases}$$

де $\eta(t) = x$, якщо остання зміна траєкторії процесу $\zeta(t)$ (обумовлена виникненням відмови i -го типу або закінченням ремонту об'єкта) відбулася в момент $t_n = t - x$ ($n \geq 0$), а i відповідає типу відмови об'єкта, яка виникла в момент t_{2j-1} (рис. 2, б, в).

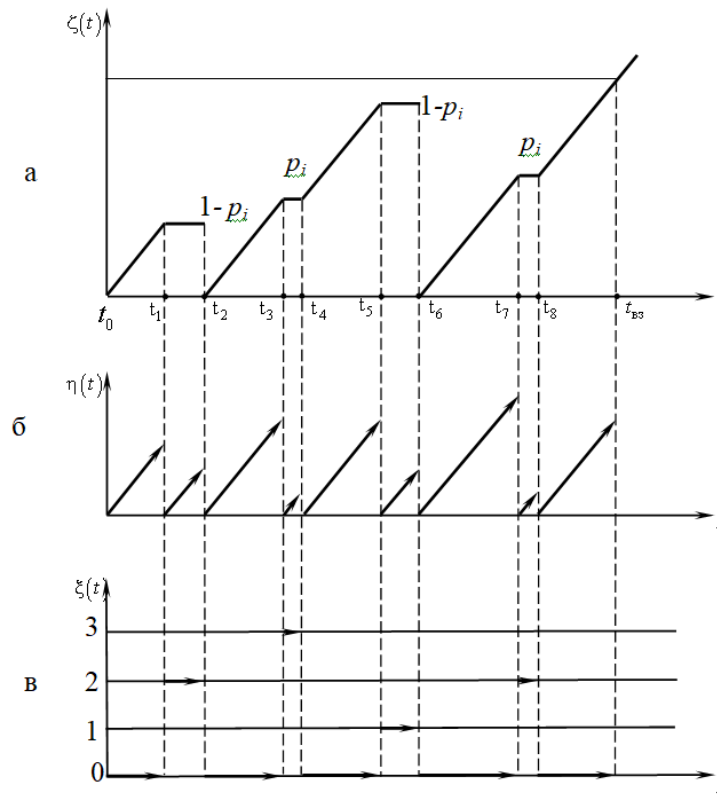


Рис. 2. Графічне зображення тривимірного випадкового процесу $X(t) = \{\zeta(t), \eta(t), \xi(t)\}$

Тоді тривимірний випадковий процес $X(t) = \{\zeta(t), \eta(t), \xi(t)\}$ представляє собою однорідний марківський процес, ймовірності переходу якого за час Δt (за умови неперервності функції розподілу $F_i(y)$, $F_{ei}(y)$, $i \geq 1$) мають вид:

$$\left. \begin{aligned} P\left\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + \Delta t, y + \Delta t, 0)\right\} &= \frac{1 - F_0(y + \Delta t)}{1 - F_0(y)}, \\ P\left\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + 0(\Delta t), 0(\Delta t), i)\right\} &= \frac{F_i(y + \Delta t) - F_i(y)}{1 - F_i(y)} + 0(\Delta t), \\ P\left\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (x + 0(\Delta t), 0(\Delta t), 0)\right\} &= p_i \frac{F_{ei}(y + \Delta t) - F_{ei}(y)}{1 - F_{ei}(y)} + 0(\Delta t), \\ P\left\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (0(\Delta t), 0(\Delta t), 0)\right\} &= (1 - p_i) \frac{F_{ei}(y + \Delta t) - F_{ei}(y)}{1 - F_{ei}(y)} + 0(\Delta t), \\ P\left\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (x, y + \Delta t, i)\right\} &= \frac{1 - F_{ei}(y + \Delta t)}{1 - F_{ei}(y)}, \quad i \geq 1, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} 0(\Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{0(\Delta t)}{\Delta t} = 0$; $x, y \geq 0$.

З виразу (9) видно, що процес $X(t)$ з ймовірністю одиниця є неперервний в кожній точці $t \in [0, \infty)$, і в той же час він не є неперервним ні на одному достатньо великому відрізку часу. Дійсно, приймаючи $\eta(0) = y$; $\xi(0) = i$ ($i \geq 0$), отримуємо, що ймовірність розриву на $[0, T]$ дорівнює

$$[F_{ei}(T + y) - F_{ei}(y)] [1 - F_{ei}(y)]^{-1}$$

і, очевидно, відмінна від нуля при достатньо великому T . Надалі, не обмежуючи загальності, вважатимемо $X(t)$ безперервним праворуч, а $X(0)(0, 0, 0) =$.

Таким чином, модель функціонування системи з комбінованим резервом часу (t_0, t_p) [13] дозволила вибрати найбільш підходящий варіант взаємодії поповнюваної t_0 і непоповнюваної t_p складових з урахуванням наявності в ЕКО різних джерел часової надлишковості, а також сформулювати загальну постановку задачі дослідження та обґрунтувати удосконалений метод її розв'язання.

Сутність удосконалення, визначаючи наукову новизну методу і відмінність від відомих методів, полягає в декомпозиції загальної математичної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі: перша – модель регенеруючого випадкового процесу для аналізу надійності функціонування об'єкта з поповнюваною складовою t_0 загального резерву часу, результат дослідження якої використовується для другої моделі – марківського процесу спеціального виду, що описує функціонування системи з непоповнюваною складовою t_p з урахуванням обраного варіанту взаємодії між складовими t_0 і t_p резервного часу, що забезпечує синтез окремих результатів дослідження цих моделей та отримання загального розв'язання сформульованої наукової задачі.

Реалізація запропонованого методу дозволяє спростити отримання нових розрахункових формул для оцінки основних показників надійності системи з комбінованим резервом часу і дає можливість сумісно враховувати різні типи відмов та збоїв технічних і програмних засобів ТЛКО та параметри використовуваної надлишковості.

Алгоритм практичної реалізації даного методу включає в себе сукупність наступних основних взаємопов'язаних операцій:

1. Вибір та обґрунтування варіанту взаємодії поповнюваної t_0 і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу в процесі функціонування системи ОЧ;

2. На першому етапі – дослідження моделі надійності об'єкта з поповнюваним резервом часу t_0 при виконанні часового обмеження $t_0 > t_d$ з метою обґрунтування умов, при яких напрацювання до відмови буде близька до експоненціального закону з параметром $\lambda_i^* = \lambda_i q_i$, $i \geq 1$, де $q_i = 1 - F_{ei}(t_d)$; зменшення значення t_3 на величину t_d : $t_3 - t_d = t_3^*$;

3. На другому етапі – побудова моделі функціонування об'єкта з непоповнюваним резервом часу t_p з метою перевірки часового обмеження $T_{np}(t_3) > t_p$ і отримання наближених розрахункових формул для показників надійності системи ОЧ з комбінованим резервом часу при $\lambda_i^* = \lambda_i(1 - F_{ei}(t_d))$, $i \geq 1$, і $t_3^* = t_3 - t_d$;

4. Оцінка відносної похибки наближених формул.

Висновки

Запропоновано удосконалений метод побудови моделей комплексної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу в основі якого лежить декомпозиція загальної математичної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі.

Використання удосконаленого методу дозволяє помітно спростити процес побудови моделей оцінки показників надійності об'єктів ТЛКО з комбінованим резервом часу і отримати придатні для практичної реалізації результати.

Перспективним напрямком подальших досліджень є інтеграція запропонованого удосконаленого методу в інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, що дозволить автоматизувати процеси оцінки показників надійності ЕКО.

Література

1. Раскін Л.Г. Декомпозиційний метод вирішення завдань аналізу марківських систем високої розмірності [Електронний ресурс] / Раскін Л.Г., Сіра О.В., Корсун Р.О. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2020. – Т. 2 (60). – С. 90 – 94. – Режим доступу: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.090>.
2. Пустовойтов П.С. Моделі і методи аналізу немарківського трафіку у вузлах телекомунікаційних мереж: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.02 “Телекомунікаційні системи та мережі”. [Електронний ресурс] / Харків: ХНУРЕ, 2014. 36 с. – Режим доступу: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/2787> (дата звернення: 3.01.2025).
3. Креденцер Б.П. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія / [Б.П. Креденцер та ін.]. – Київ: Фенікс, 2013. С. 121–145.
4. Gallager R. Discrete Stochastic Processes: book: [Electronic resource] / Gallager R. // Massachusetts: LibreTexts, 2024. 332 p. – Mode of access: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Signal_Processing_and_Modeling/Discrete_Stochastic_Processes_\(Gallager\)/06%3A_Markov_processes_with_countable_state_spaces/](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Signal_Processing_and_Modeling/Discrete_Stochastic_Processes_(Gallager)/06%3A_Markov_processes_with_countable_state_spaces/) (дата звернення: 10.01.2025).
5. Креденцер Б.П. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія / Креденцер Б.П. – Київ: Фенікс, 2014. 314 с.
6. Дубина В.О. Моделі надійності електронного комунікаційного обладнання з урахуванням

характеристик контролю [Електронний ресурс] / В.О. Дубина, І.В. Кононова // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Том 35 (74). – № 1. – С. 34 – 39. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/05>.

7. Сенів М., Роїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження [Електронний ресурс] / М. Сенів, О. Роїк // Науковий вісник НЛТУ України. – 2021. – Т. 31. – № 6. – С. 87–91. – Режим доступу: DOI:10.36930/40310613.

8. Raghuvanshi K. A time-variant fault detection software reliability model [Електронний ресурс] / K. Raghuvanshi, A. Agarwal, K. Jain // SNAp.Sci. – 2021. – № 3(18). – Mode of access: 10.1007/s42452-020-04015-z.

9. Могилевич Д.І. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів [Електронний ресурс] / Д.І. Могилевич, В.В. Сінько // Information Technology and Security. 2022 Vol. 10. – С. 50 – 59. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/805e00b4-d33f-4363-891e-e90c96f14046/content> (дата звернення: 14.01.2025).

10. Князева Н. Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання [Електронний ресурс] / Н. Князева, О. Ненов // Вісник Університету "Україна" Серія Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – 2021. – № 2(23). – Режим доступу: 10.36994/2707-4110-2019-2-23-18.

11. Ahmed N.O. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency [Electronic resource] / N.O. Ahmed, B. Bhargava // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2020. – № 8(3). – P. 847–860. – Mode of access: 10.1109/TCC.2018.2814989.

12. Креденцер Б.П. Оцінювання експлуатаційно-технічних характеристик об'єктів телекомунікацій за апіорної невизначеності: монографія / Креденцер Б.П., Могилевич Д.І. Міночкін А.І. // Київ: Фенікс, 2012. – 332 с.

13. Тихонов М.В., Кононова І.В. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку [Електронний ресурс] / М.В. Тихонов, І.В. Кононова // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Том 36 (75) – № 1. – С. 27 – 42. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/01>.

References

1. Raskin L.H. Dekompozitsiyni metod vyrishennia zavdan analizu markivskykh system vysokoi rozmirnosti [Elektronnyi resurs] / Raskin L.H., Sira O.V., Korsun R.O. // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. – 2020. – Т. 2 (60). – С. 90 – 94. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.090>.

2. Pustovoitov P.Ie. Modeli i metody analizu nemarkivskoho trafiku u vuzlakh telekomunikatsiinykh merezh: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.12.02 "Telekomunikatsiiny systemy ta merezhi". [Elektronnyi resurs] / Kharkiv: KhNURE, 2014. 36 s. – Rezhym dostupu: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/2787> (data zvernennia: 3.01.2025).

3. Kredentser B.P. Nadiinist system z nadlyshkovistii: metody, modeli, optymizatsiia: monohrafiia / [B.P. Kredentser ta in.]. – Kyiv: Feniks, 2013. S. 121–145.

4. Gallager R. Discrete Stochastic Processes: book: [Electronic resource] / Gallager R. // Massachusetts: LibreTexts, 2024. 332 r. – Mode of access: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Signal_Processing_and_Modeling/Discrete_Stochastic_Processes_\(Gallager\)/06%3A_Markov_processes_with_countable_state_spaces/](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Signal_Processing_and_Modeling/Discrete_Stochastic_Processes_(Gallager)/06%3A_Markov_processes_with_countable_state_spaces/) (data zvernennia: 10.01.2025).

5. Kredentser B.P. Otsinka nadiinosti rezervovanykh system pry обмеженні vykhidni informatsii: monohrafiia / Kredentser B.P. – Kyiv: Feniks, 2014. 314 s.

6. Dubyna V.O. Modeli nadiinosti elektronnoho komunikatsiinoho obladdannia z urakhuvanniam kharakterystyk kontroliu [Elektronnyi resurs] / V.O. Dubyna, I.V. Kononova // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seria: Tekhnichni nauky. – 2024. – Том 35 (74). – № 1. – С. 34 – 39. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/05>.

7. Seniv M., Roik O. Zasoby rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti prohrannoho zabezpechennia na pidstavi modeli z urakhuvanniam nedoskonalooho vidlahodzhennia [Elektronnyi resurs] / M. Seniv, O. Roik // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – 2021. – Т. 31. – № 6. – С. 87–91. – Rezhym dostupu: DOI:10.36930/40310613.

8. Raghuvanshi K. A time-variant fault detection software reliability model [Elektronnyi resurs] / K. Raghuvanshi, A. Agarwal, K. Jain // SNAp.Sci. – 2021. – № 3(18). – Mode of access: 10.1007/s42452-020-04015-z.

9. Mohylevych D.I. Modeli nadiinosti ob'ektiv telekomunikatsiinoho obladdannia z neznetsinenymy або povnistiю znetsinenymy vidmovamy prohrannykh zasobiv [Elektronnyi resurs] / D.I. Mohylevych, V.V. Sinko // Information Technology and Security. 2022 Vol. 10. – С. 50 – 59. – Rezhym dostupu: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/805e00b4-d33f-4363-891e-e90c96f14046/content> (data zvernennia: 14.01.2025).

10. Kniazieva N. Otsinka strukturnoi nadiinosti telekomunikatsiinykh merezh nevyznachenoї topolohii na osnovi imitatsiinoho modeliuvannia [Elektronnyi resurs] / N. Kniazieva, O. Nienov // Visnyk Universytetu "Ukraina" Seria Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetika. – 2021. – № 2(23). – Rezhym dostupu: 10.36994/2707-4110-2019-2-23-18.

11. Ahmed N.O. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency [Electronic resource] / N.O. Ahmed, B. Bhargava // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2020. – № 8(3). – P. 847–860. – Mode of access: 10.1109/TCC.2018.2814989.

12. Kredentser B.P. Otsiniuvannia ekspluatatsiino-tekhnichnykh kharakterystyk ob'ektiv telekomunikatsii za apioriної nevyznachenosti: monohrafiia / Kredentser B.P., Mohylevych D.I. Minochkin A.I. // Kyiv: Feniks, 2012. – 332 s.

13. Tykhonov M.V., Kononova I.V. Udoskonalena metodyka pobudovy dvostoronnikh otsinok pokaznykiv nadiinosti funktsionuvannia komunikatsiinoho obladdannia merezh zviazku [Elektronnyi resurs] / M.V. Tykhonov, I.V. Kononova // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seria: Tekhnichni nauky. – 2025. – Том 36 (75) – № 1. – С. 27 – 42. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/01>.