

УДК 004.942

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07>**Кононова І.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тихонов М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена аналізу результатів комплексної оцінки показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання при відмовах і збоях технічних та програмних компонентів. Сучасні електронні комунікаційні мережі складаються з об'єктів електронного комунікаційного обладнання, які є інтегрованими системами, що включають в себе як технічні, так і програмні компоненти. Визначено, що об'єктом теоретичного дослідження є процеси функціонування електронного комунікаційного обладнання в умовах обмеженої надійності як технічних, так і програмних компонентів.

Проведено теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з використанням моделей, яке дозволило кількісно оцінити вплив на показники надійності обладнання різних факторів при їх сумісному урахуванні.

У статті наведено результати кількісної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання в умовах відмов та збоїв технічних і програмних засобів обладнання з урахуванням можливості розбиття виконуваних завдань на послідовно виконувані етапи з запам'ятовуванням проміжних результатів.

На основі аналізу результатів розрахунку виявлено деякі особливості та властивості комбінованого часового резервування, що показує ефективність використання цього методу для боротьби зі збоями та знецінюючими відмовами об'єктів комунікаційного обладнання.

Результати оцінки показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання дозволять в подальшому визначити оптимальні стратегії управління відмовами і збоями та підвищити стійкість комунікаційного обладнання.

Ключові слова: *технічні компоненти, показники надійності, збої, відмови, електронне комунікаційне обладнання, резерв часу.*

Постановка проблеми. У сучасному інформаційному суспільстві об'єкти електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної передачі та обробки інформації. З усильним зростанням обсягів даних та складності мережевих систем виникає загострення питань щодо надійності цих об'єктів, а також необхідність обґрунтування практичних рішень та розробці інтегрованих стратегій, які можуть бути використані для підвищення показників надійності ЕКО у реальних умовах функціонування. Надійність ЕКО залежить від надійності як технічних, так і програмних компонентів. Для підвищення надійності об'єктів ЕКО можна використовувати різні методи, включаючи комбіноване часове резервування. Для обґрунтування найбільш ефективних шляхів і методів забезпечення необхідного рівня показників надійності ЕКО в умовах комплексної взаємодії різних фак-

торів доцільно проводити кількісну оцінку надійності функціонування об'єктів ЕКО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні та зарубіжні вчені займалися розробкою математичних моделей і методів аналізу надійності як технічних систем, так і програмного забезпечення [1–7]. Але аналіз сучасних досліджень показав, що деякі з них обмежуються аналізом лише технічних аспектів та ігнорують вплив програмного забезпечення на показники надійності ЕКО в цілому, або ці роботи фокусуються на дослідженні програмних помилок, виявленні їх причин, проявів та наслідків. Проте, у цих дослідженнях практично відсутні результати, що сумісно описують вплив обмеженої надійності програмного забезпечення на надійність технічної компоненти та на надійність функціонування об'єкту ЕКО в цілому.

Метою роботи є оцінка результатів теоретичного дослідження впливу різних факторів на

показники надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах обмеженої надійності технічних та програмних засобів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінка надійності об'єктів з різними типами відмов. На рис. 1–3 наведено графіки залежності ймовірності відмови системи об'єкт-час $Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - P(t_3, t_d, t_p)$ від значень параметрів t_d і t_p використовуваного комбінованого резерву часу при виникненні в об'єкті різних типів відмов: незнецінюючих і (або) знецінюючих попереднє напрацювання ($0 \leq p \leq 1$). На рисунках прийнято позначення

$$\lambda^* = \lambda q = \lambda(1 - F_b(t_d)) = \lambda e^{-\mu t_d}. \quad (1)$$

Аналіз графіків дозволяє встановити наступне:

1. При невеликих кратностях непоповнюваного резерву часу $m_i = t_p / t_3$ і $q = \text{const}$ ймовірність відмови системи зменшується незначно. В цьому випадку ефективнішим виявляється збільшення поповнюваного резерву часу (зменшення ймовірності q). Так, зменшення ймовірності q на порядок призводить до зменшення приблизно в стільки ж разів ймовірності відмови системи $Q(t_3, t_p, t_d)$. При $m_i > 0,8 - 0,9$ ефективність часового резервування за рахунок збільшення непоповнюваної складової різко зростає (рис. 1).

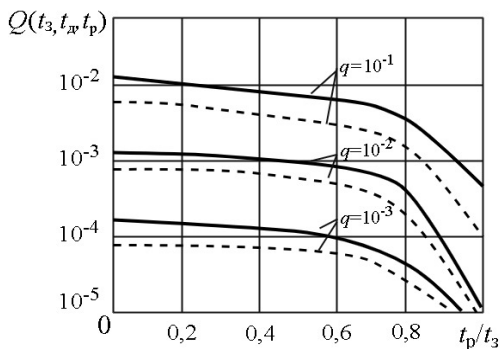


Рис. 1. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_p/t_3 ; $t_3 = \text{const}$; $\lambda^* t_3 = 0,1$ при заданих значеннях $q = \exp(-\mu t_d)$:
 ————— $p = 0$; - - - - - $p = 0,5$

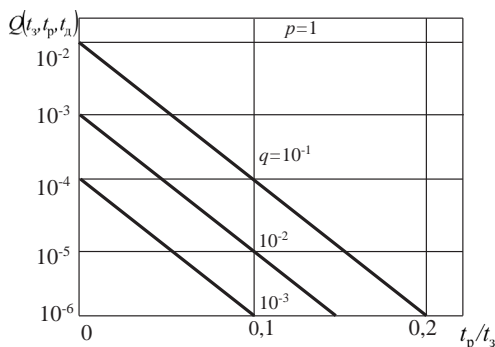


Рис. 2. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_p/t_3 при $p = 1$; $t_3 = \text{const}$; $\lambda^* t_3 = 0,1$ і різних значеннях ймовірності q .

Наприклад, збільшення кратності непоповнюваного резерву m_i з 0,8 до 1,0 дозволяє зменшити ймовірність $Q(t_3, t_p, t_d)$ приблизно в 100 разів. Такого ж ефекту можна досягти при $m_i = 0,8$, якщо зменшити ймовірність q на два порядки, тобто шляхом істотного збільшення поповнюваного резерву часу t_d .

2. Зі збільшенням p частки незнецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці ефективність часового резервування за рахунок збільшення кратності непоповнюваного резерву часу m_i при $q = \text{const}$ істотно зростає (рис. 1, 2), при цьому в системах з повністю незнецінюючими відмовами ($p = 1$) залежність $Q(t_3, t_p, t_d) = f(m_i)$ носить лінійний характер (рис. 2). Зокрема, при $m_i = 0,1$; $q = \lambda t_3 = 0,1$ і $p = 0; 0,5$ і 1,0 значення ймовірності $Q(t_3, t_p, t_d)$ відповідно рівні 10^{-2} , $7 \cdot 10^{-3}$ і 10^{-4} . Зі збільшенням m_i до 0,2 за інших незмінних умов значення ймовірності відмови системи для $p = 0; 0,5$ і 1,0 стають відповідно рівними $9 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-3}$ і 10^{-6} .

Отже, із зміною кратності непоповнюваного резерву m_i з 0,1 до 0,2 і збільшенням p з 0 до 1 ймовірність відмови системи $Q(t_3, t_p, t_d)$ зменшується майже в 10^4 разів.

3. Графіки рис. 3 ілюструють залежності ймовірності відмови системи від відносно мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при $p = 0$; $q = 0,1$, $\lambda^* = \text{const}$ і різних значеннях $m_i = t_p/t_3$.

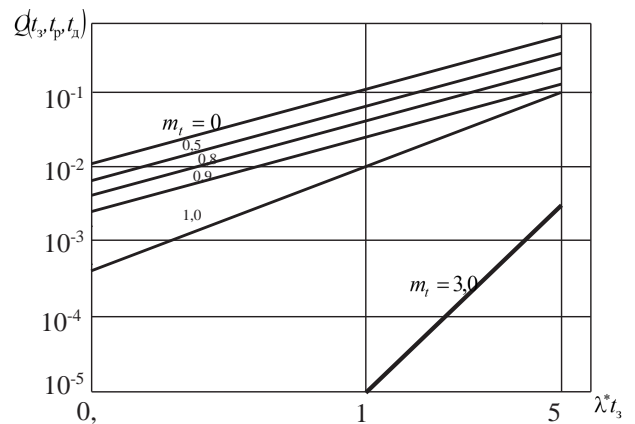


Рис. 3. Графіки залежності ймовірності відмови системи від відносно мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при $p = 0$; $q = 0,1$, $\lambda^* = \text{const}$ і різних значеннях $m_i = t_p/t_3$

З рисунка видно, що зі збільшенням мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ ефективність часового резервування за рахунок непоповнюваної складової резерву часу зменшується. Так, при $p = 0$; $q = 0,1$ і $\lambda^* t_3 = 0,1$ отримуємо відношення

$$Q(t_3, t_p, t_d) / Q(t_3, 3t_p, t_d) \approx 10^3,$$

а при $\lambda^*t_3 = 5$ це відношення рівне 30, тобто зменшується більш ніж в тридцять разів.

Ефективність часового резервування у випадку сумісного використання в системі поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових зручно оцінювати за допомогою функцій виграшу W , що характеризують відносних виграш в надійності у порівнянні з системою без часової надлишковості.

Так, для ймовірності відмови (зриву функціонування) $Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - P(t_3, t_d, t_p)$ системи функція виграшу має вид:

$$W_Q = \frac{Q(t_3, 0, 0)}{Q(t_3, t_d, t_p)} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - P(t_3, t_d, t_p)}, \quad (2)$$

$$Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_d \rceil} (-1)^j \frac{(\gamma - j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{(\gamma - j\rho)}{j+1}\right) e^{-(j+1)\rho}, \quad (3)$$

де $\rho = (1-p)\lambda^*(t_3 - t_d)$; $\gamma = (1-p)\lambda^*t_p$; $\lambda^* = \lambda q = \lambda e^{-\mu t}$.

На рис. 4 наведено графіки залежності $W_Q^{-1} = f(\lambda t_3)$, побудовані за допомогою виразів (2) і (3).

Аналіз графіків показує, що при малих значеннях λ^*t_3 виграш W_Q дуже високий, а зі збільшенням λ^*t_3 (при $\lambda^* = \text{const}$) він падає, наближуючись асимптотично до одиниці. Швидкість зменшення виграшу W_Q помітно зростає зі збільшенням частки знецінюючих відмов (при $p \rightarrow 0$). Все це свідчить про поступове зменшення ефективності комбінованого часового резервування (особливо непоповнюваною складовою t_p резерву часу) зі зростанням тривалості завдання t_3 .

Отже, в системах з комбінованим резервом часу виконується основна властивість резервування, полягає в тому, що виграш в надійності за основними показниками тим вище, чим менше величина $\rho = \lambda^*t_3$ нерезервованої системи.

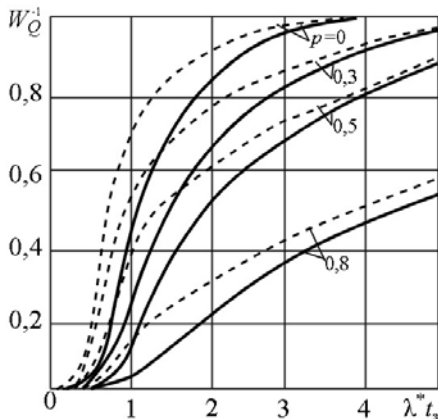


Рис. 4. Графіки залежності величини, зворотно виграшу в надійності за ймовірності зриву функціонування, від мінімального часу виконання завдання $\mu t_d = 0,5$ і різних значеннях ймовірності p : ----- $\gamma = 0,5$; ————— $\gamma = 1,0$, $\gamma = \lambda^*t_p$

Це дозволяє порівнювати ефективність часового резервування з іншими методами підвищення надійності, зокрема, зі структурним резервуванням, використовуючи еквіваленти [8].

Як було зазначено раніше, ймовірність безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу зростає зі збільшенням обох складових t_d і t_p часового резерву, наближуючись асимптотично до одиниці.

Однак при інших рівних умовах відбувається це значно повільніше в системах, в яких поряд з незнецінюючими виникають знецінюючі відмови, які вимагають відновлення працездатності об'єкта повторення всього або частини попереднього напрацювання. Це можна прослідкувати за графіками, зображеними на рис. 5.

Аналіз цих графіків дозволяє зробити і другий висновок, важливий для інженерної практики, який полягає в більш слабкій, ніж при незнецінюючих відмовах, залежності ймовірності безвідмовного функціонування від часу відновлення працездатності t_b об'єкта.

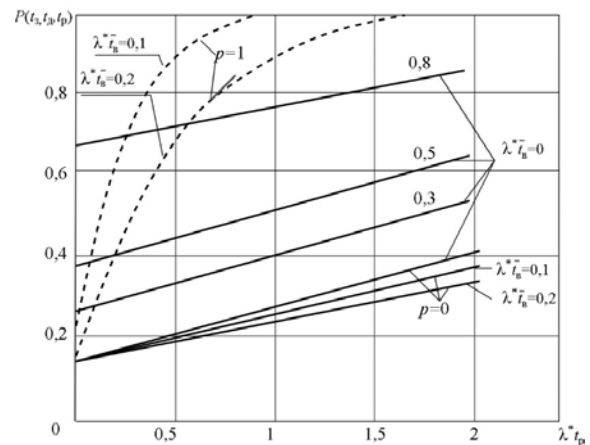


Рис. 5. Графіки залежності ймовірності безвідмовного функціонування від величини резерву часу t_p і мінімального часу виконання завдання t_3 при різних значеннях ймовірності p , середнього часу відновлення t_b , $\lambda^*t_3 = 2$ та $\mu t_d = 0,5$

Це можна пояснити наступним чином. Зменшення часу відновлення при знецінюючих відмовах скорочує лише одну складову втрат оперативного часу t , яка складається з інтервалів часу ремонту, і не зачіпає іншу, що включає в себе інтервали часу роботи, знеціненою відмовами та збоями об'єкта. При великих значеннях t_3 і t_p частка таких вторинних втрат настільки зростає, що навіть при зменшенні t_b до нуля не вдається помітно збільшити ймовірність $P(t_3, t_d, t_p)$.

Тому основні зусилля щодо підвищення надійності функціонування системи доцільно напра-

вити на захист об'єкта від вторинних наслідків відмов та збоїв, обумовлених необхідністю повторення частини або всієї проробленої до моменту знецінюючої відмови роботи.

Збільшення частки знецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці (при $p \rightarrow 0$) може призвести також до суттєвого збільшення середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3)$.

Дана характеристика корисна як допоміжна і зазвичай використовується для обчислення коефіцієнту використання виділеного резерву часу δ_3 , що обчислюється за формулою:

$$\delta_3 = \frac{\bar{T}_{вз} - t_3}{t_3}, \quad (4)$$

де t_3 – мінімальний час виконання завдання.

Цей коефіцієнт характеризує середні відносні витрати резервного часу до виконання завдання.

Розглянемо вплив кількості етапів виконання завдання n на показники надійності.

Розглянемо випадок $i = 1$, коли завдання розбивається на n ($n > 1$) етапів з однаковим мінімальним часом виконання $\Delta = \frac{t_3}{n}$, і будемо вважати, що таке розбиття не потребує витрат додаткового часу або ці витрати настільки малі, що ними можна практично знехтувати. В цьому випадку формула для оцінки надійності системи об'єкт-час приймає вид [9]:

$$\begin{cases} P(t_3, t_d, t_p, n) = 1, & p = 1, \\ P(t_3, t_d, t_p, n) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/t_d \rfloor} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda^* (1-p)t_3^j (1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda^* (1-p)(t_p - jt_3/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, & 0 \leq p_1 < 1, \end{cases} \quad (5)$$

де $n \geq 1$; $\lambda^* = \lambda q = \lambda [1 - F_b(t_d)]$; $t_3^* = t_3 - t_d$.

При $n = 1$ формула (5) зводиться до виразу [9]:

$$\begin{cases} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/(t_3-t_d) \rfloor} (-1)^j e^{-(j+1)p} \frac{(\gamma - j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{\gamma - j\rho}{j+1}\right), & 0 \leq p_1 < 1, \\ P(t_3, t_d, t_p) = 1, & p = 1. \end{cases}$$

Розрахунки за формулою (5) показують, що ймовірність безвідмовного функціонування системи суттєво залежить від кількості етапів виконання завдання n і ймовірності p збереження попередніх результатів (рис. 6).

При цьому вииграш в надійності за ймовірністю безвідмовного функціонування

$$W_p = \frac{P(t_3, t_d, t_p, 2)}{P(t_3, t_d, t_p, 1)}$$

при розбитті виконуваного завдання на два етапи, різко зростає із збільшенням резерву часу, а потім спадає (рис. 7). Отже, існує деяке оптимальне значення резерву часу, при якому забезпечується невеликий вииграш W_p при розбитті завдання на етапи.

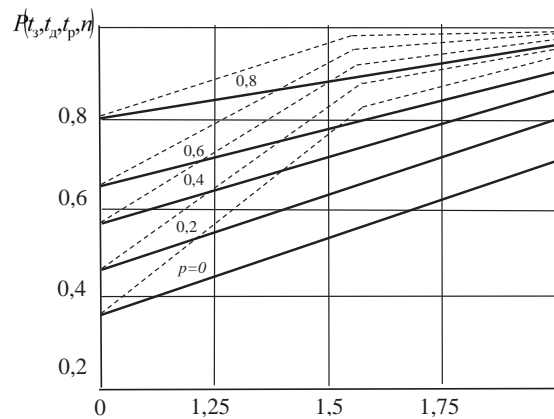


Рис. 6. Залежність ймовірності безвідмовного функціонування системи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів: ($t_b = 0$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$) при $n = 1$; ----- при $n = 2$

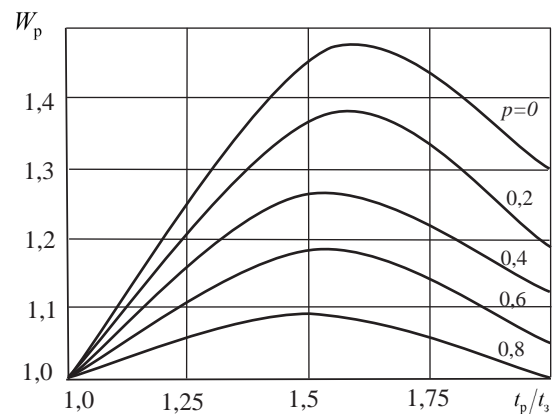


Рис. 7. Залежності виграшу в надійності при розбитті завдання на два етапи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів ($t_b = 0$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

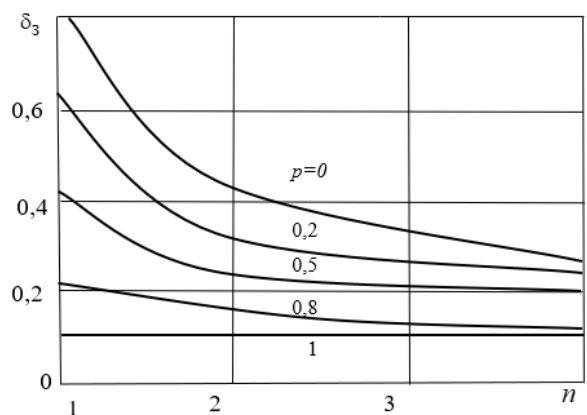


Рис. 8. Залежності середніх відносних витрат резерву часу від кількості етапів n при різних значеннях ймовірності збереження попередніх результатів ($\lambda q t_b = 0,1$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

Графіки рис. 7 показують також, що розбиття завдання на етапи дає помітно більший виграш для систем, в яких переважають частково знецінюючі відмови ($p \rightarrow 0$).

З графіків рис. 8 видно, що суттєве зниження відносного витрачання резерву часу δ_3 (формула 4) можна забезпечити при розбитті завдання навіть на невелике число етапів ($n = 3 \div 4$). При цьому ймовірність p збереження попередніх результатів чинить великий вплив на величину δ_3 , що свідчить про необхідність та доцільність прийняття спеціальних мір щодо зменшення частки знецінюючих відмов технічних та програмних засобів об'єкта.

Висновки. Проведене теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів ЕКО з використанням моделей оцінки надійності дозволило кількісно оцінити вплив на показники надійності різних факторів при їх сумісному урахуванні.

Такий комплексний підхід дав можливість виявити деякі важливі загальні та часткові властивості комбінованого часового резервування при суміс-

ному використанні поповнюваної t_d і непоповнюваної t_{\square} складових загального резерву, що дозволило зробити висновок про ефективності цього методу резервування і доцільності його використання для поліпшення показників надійності.

Показано, що ймовірність $P(t_z, t_d, t_p, n)$ завжди можна довести до необхідного значення, вибираючи відповідні значення t_d , t_p і кількість етапів n , на які доцільно розбивати виконуване завдання.

При цьому необхідно враховувати, що в даній моделі розбиття на етапи не пов'язано зі збільшенням мінімального завдання, тому будь-яке збільшення кількості етапів n доцільне, оскільки воно призводить до зменшення вторинних втрат оперативного часу, викликаних знецінюючими відмовами, і забезпечує підвищення ефективності часового резервування.

Вплив кількості етапів n можна прослідкувати і за середньою відносною витратою резерву часу до виконання завдання δ_3 . Суттєвого зниження коефіцієнта δ_3 можна досягти при невеликих значеннях n .

Список літератури:

1. 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*. 2020. № 4. P. 163–177. DOI:10.15588/1607-3274-2020-4-16.
2. Трофімук А. В. Оцінка якості програмного забезпечення за показниками надійності: thesis. 2018. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/11471> (дата звернення: 28.04.2023).
3. Сенів М., Поїк О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделі з урахуванням недосконалого відлагодження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87–91. DOI:10.36930/40310613.
4. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *SN Appl. Sci*. 2021. № 3(18). DOI: 10.1007/s42452-020-04015-z.
5. Pavlov N. Iliev A. Rahneva A. Kyurkchiev N. Some Transmuted Software Reliability Models. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*. 2019. № 2 (1). P. 64–70. DOI: 10.33187/jmsm.434277.
6. 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. № 8 (1). P. 111–123. DOI:10.35833/MPCE/2018.000666.
7. Hrytsiuk Yu. I., Mukha T. Methods for determining the quality of software. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. Vol. 30, no. 1, P. 158–167, DOI: <https://doi.org/10.36930/40300127>.
8. Mogylevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies*. Springer. 2018. №. 560, P. 101–117. 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.
9. 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.

Kononova I.V., Tykhonov M.V. COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT

The article is devoted to the analysis of the results of a comprehensive assessment of the reliability of electronic communication equipment in case of failures and malfunctions of hardware and software components. Modern electronic communication networks consist of electronic communication equipment, which are integrated systems that include both hardware and software components. It is determined that the object of theoretical research is the processes of functioning of electronic communication equipment in conditions of limited reliability of both hardware and software components.

A theoretical study of the reliability of the functioning of electronic communication equipment using models has been carried out, which allowed to quantify the impact on the reliability indicators of various factors when they are taken into account together.

The article presents the results of a quantitative assessment of the reliability of functioning of electronic communication equipment under conditions of failures and malfunctions of hardware and software, taking into account the possibility of dividing the tasks performed into sequential stages with the memorization of intermediate results.

Based on the analysis of the calculation results, some features and properties of combined time redundancy have been identified, which shows the effectiveness of using this method to combat failures and devaluing failures of communication equipment.

The results of the assessment of reliability indicators of electronic communication equipment will allow us to further determine the optimal strategies for managing failures and disruptions and increase the sustainability of communication equipment.

Key words: *technical components, reliability indicators, failures, failures, electronic communication equipment, time reserve.*