https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-1
УДК 004.942

ТИХОНОВ МИКОЛА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
https://orcid.org/0009-0004-3736-47614
e-mail: tichonov@ukr.net
КОНОНОВА ІРИНА
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
https://orcid.org/0009-0004-3736-4761
e-mail: viti21@ukr.net

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З КОМБІНОВАНИМ ЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

Розглянуто актуальне завдання комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням, з метою підвищення ефективності їхнього функціонування та забезпечення заданого рівня надійності.

Комплексність підходу забезпечується сумісним урахуванням низки чинників, що впливають на надійність обладнання. Серед цих чинників: обмежена надійність технічних і програмних засобів, наявність знецінюючих і незнецінюючих відмов, використання поповнюваної та непоповнюваної складових резерву часу, поділ завдань на етапи з проміжним збереженням результатів, а також рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу.

На першому етапі розробленої методики проаналізовано особливості функціонування електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. На другому етапі методики обґрунтовано доцільність декомпозиції загальної моделі функціонування на дві часткові моделі – для поповнюваної та непоповнюваної складових резерву часу. У подальших етапах сформовано науково-методичний апарат оцінювання надійності з урахуванням різних факторів, зокрема у випадках повної та обмеженої вихідної інформації. Для останнього випадку запропоновано підхід до побудови двосторонніх оцінок показників надійності з використанням базового функціоналу.

Сформульовано науково обґрунтовані рекомендації щодо шляхів підвищення надійності функціонування електронного комунікаційного обладнання. Зокрема, доведено ефективність комбінованого резервування часу за умови раціонального поєднання його складових. Запропоновано методи зменшення знецінення напрацювань, зокрема шляхом поділу завдань на етапи та оптимізації їх кількості.

Ключові слова: показники надійності, надійність, електронне комунікаційне обладнання, резервування, відмова, збій, декомпозиція.

TYKHONOV MYKOLA
KONONOVA IRYNA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT WITH COMBINED TIME REDUNDANCY

The article considers the urgent task of a comprehensive assessment of reliability indicators of electronic communication equipment with combined time redundancy in order to increase the efficiency of their operation and ensure a given level of reliability.

The comprehensiveness of the approach is ensured by the joint consideration of a number of factors affecting the reliability of the equipment. These factors include: limited reliability of hardware and software, the presence of impairing and nonimpaired failures, the use of replenishable and nonreplenishable components of the time reserve, the division of tasks into stages with intermediate storage of results, and the level of qualification of the operating personnel.

At the first stage of the developed methodology, the features of the functioning of electronic communication equipment with a combined time reserve are analyzed. Two sources of the time reserve are identified: a replenishable reserve (functional inertia) and a non-replenishable reserve (additional operational time or performance reserve). The mechanism for checking time constraints at each stage of functioning is considered, which allows achieving the effect of "dilution" of the failure stream.

At the second stage of the methodology, the expediency of decomposing the general model of functioning into two partial models - for the replenishable and non-replenishable components of the time reserve - is substantiated. This approach simplifies the construction of the mathematical apparatus and provides a synthesis of partial results for further analysis. In the subsequent stages, a scientific and methodological apparatus for reliability assessment is formed, taking into account various factors, in particular in cases of complete and limited initial information. For the latter case, an approach to constructing bilateral estimates of reliability indicators using the basic functionality is proposed.

Scientifically based recommendations on ways to improve the reliability of electronic communication equipment are formulated. In particular, the effectiveness of combined time reservation is proved, provided that its components are rationally combined. Methods of reducing the impairment of developments are proposed, in particular by dividing tasks into stages and optimizing their number. The obtained results can be used in engineering practice in the design and modernization of electronic communication equipment.

Keywords: reliability indicators, reliability, electronic communication equipment, redundancy, failure, failure, decomposition

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025
Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій зростають

вимоги до надійності функціонування електронного комунікаційного обладнання (ЕКО), особливо в критичних сферах застосування. Одним із ефективних підходів до підвищення надійності є впровадження комбінованого часового резервування, яке поєднує різні стратегії резервування для мінімізації ймовірності відмов та зниження часу простою систем. Однак на сьогодні відсутня уніфікована методика, що дозволяє здійснювати всебічне оцінювання показників надійності ЕКО з урахуванням специфіки комбінованого часового резервування. Це ускладнює процес прийняття обґрунтованих технічних рішень щодо проєктування, експлуатації та модернізації таких систем.

У зв'язку з цим виникає необхідність у науково обґрунтованій методиці, яка забезпечить: формалізацію процесу оцінювання показників надійності ЕКО з комбінованим часовим резервуванням; побудову математичних моделей, що адекватно описують поведінку об'єктів з урахуванням їх структурних і функціональних особливостей; врахування впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на ймовірнісні характеристики функціонування; забезпечення комплексного підходу до оцінювання, який дозволяє інтегрувати різні критерії надійності (ймовірність безвідмовної роботи, середній час безвідмовної роботи, готовність тощо); можливість практичного застосування методики для аналізу, порівняння та оптимізації систем зв'язку.

Таким чином, основним завданням дослідження є розроблення методики комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання, в якому реалізовані схеми комбінованого часового резервування, з метою підвищення ефективності їхнього функціонування та забезпечення заданого рівня надійності.

Аналіз досліджень та публікацій

Розвитку теоретичних основ у сфері дослідження ЕКМ присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених [1 – 5], аналіз цих публікацій показує, що існує значний інтерес до підвищення показників надійності ЕКО. Особлива увага приділяється декомпозиції системи на часткові моделі для полегшення математичного аналізу [6 – 8]. Запропоновані методи також дозволяють ефективно оцінювати вплив обмеженої інформації на показники надійності для оптимізації технічних рішень у практичних застосуваннях [9, 10].

Однак, наявний науково-методичний апарат не повною мірою дозволяє проводити оцінювання показників надійності ЕКО та забезпечувати прийняття обґрунтованих рішень під час виконання комплексу завдань з підвищення надійності наявного та перспективного обладнання.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка методики комплексного оцінювання показників надійності ЕКО, в яких застосовується комбіноване часове резервування.

Виклад основного матеріалу

Метою запропонованої методики є створення науково обґрунтованого підходу, що дозволяє здійснювати комплексне оцінювання надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з урахуванням впливу комбінованого часового резервування. Комплексність оцінювання забезпечується сумісним урахуванням сукупності факторів, впливаючих на надійність функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим часовим резервуванням, основними з яких є такі: обмежена надійність технічних та програмних засобів обладнання, що призводить до виникнення відмов та збоїв об'єктів ЕКО; різні наслідки відмов та збоїв: при незнецінюючих відмовах (при $p = 1$); відновлення працездатності (ремонт відмовивших об'єктів) і продовжування виконання завдання; при знецінюючих відмовах (при $p = 0$) – після ремонту повторення всього або тільки частини знеціненого корисного напрацювання; розгляд загального випадку, коли потік відмов та збоїв об'єкта включає в себе «оббурюванні» впливи на процес функціонування обох типів ($0 \leq p \leq 1$); сумісне урахування двох складових комбінованого резерву часу: поповнюваною складовою $t_д$ – для боротьби з збоями і непоповнюваною складовою t_p – для компенсації втрат часу при стійких відмовах; розбиття виконуваного завдання на складові частини (етапи) з запам'ятовуванням проміжних результатів для зменшення втрат корисного часу при знецінюючих відмовах; рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу, який характеризується часом відновлення працездатності об'єкта.

Вихідні данні, обмеження та допущення, а також формалізація процесу дослідження представлено в [11]. Методика включає в себе сукупність взаємопов'язаних етапів, послідовне виконання яких призводить до досягнення поставленої мети (рис. 1). Проведений аналіз дозволив виявити ряд особливостей функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу (перший етап методики). Наведемо основні з них:

1. Електронне комунікаційне обладнання ЕКМ слід розглядати як складний апаратно-програмний комплекс, що представляє собою сукупність взаємопов'язаних технічних та програмних засобів, володіючих обмеженою надійністю та є джерелами збоїв і відмов. Дефекти програмного забезпечення можуть проявлятися у випадкові моменти часу і мати наслідки, аналогічні тим, які викликані відмовами техніки, а саме: втрату окремих функцій або затримку їх виконання, спотворення інформації та знецінювання частини або всієї пророблeної до моменту відмови роботи і т. д. Більш того, при складні взаємодії технічних та програмних засобів часто важко ідентифікувати джерело порушення нормального функціонування системи. Тому важливо не тільки забезпечити високу надійність програмного забезпечення, але і враховувати її при аналізі надійності об'єктів електронного

комунікаційного обладнання ЕКМ.

2. Об'єкти ЕКО містять два різних за своїми властивостями джерела резерву часу. Перше джерело – це функціональна інерційність, яка допускає незначні перерви в роботі на деякий час $t_д$ (поповнюваний резерв – перша складова комбінованого резерву часу), і при виконанні умови $t_в \leq t_д$ система об'єкт-час (ОЧ) продовжує нормально функціонувати, не реагуючи на відмови і збої об'єкта. Друга складова – непоповнюваний резерв t_p загального резервного часу може створюватися за рахунок збільшення часу, що виділяється системі ОЧ для виконання завдання тривалістю $t_з$ і який називається оперативним часом $t = t_з + t_p$, або шляхом зменшення мінімального часу виконання завдання $t_з$ за рахунок запасу продуктивності, що дозволяє створити часовий резерв без збільшення оперативного часу системи. Хоча в системі, яка розглядається, резерв часу є єдиним, при аналізі надійності такої системи ОЧ зручно вважати його таким, що складається з двох складових: поповнюваною $t_д$ і непоповнюваною t_p.

3. На відмінність від систем ОЧ, які містять тільки поповнюваний резерв $t_д$ або тільки непоповнюваний t_p, при використанні комбінованого резерву часу $(t_д, t_p)$ передбачені одночасно обмеження $t_д$ на час $t_в$ кожного відновлення працездатності об'єкта і обмеження t_p на добуток непродуктивного часу $T_{нп}(t_з)$ до виконання завдання. Кожна відмова або збій об'єкта перевіряється на виконання встановлених часових обмежень: на першому етапі перевіряється умова $t_в > t_д$, а на другому – умова $T_{нп}(t_з) > t_p$.

При виконанні першої умови фіксується стійка відмова та починається ремонт об'єкта, а при $t_в \leq t_д$ система ОЧ «не помічає» виникаючий короткотривалий збій та продовжує нормально функціонувати. Виконання умови на другому етапі перевірки означає відмову (зрив функціонування) системи об'єкт-час.

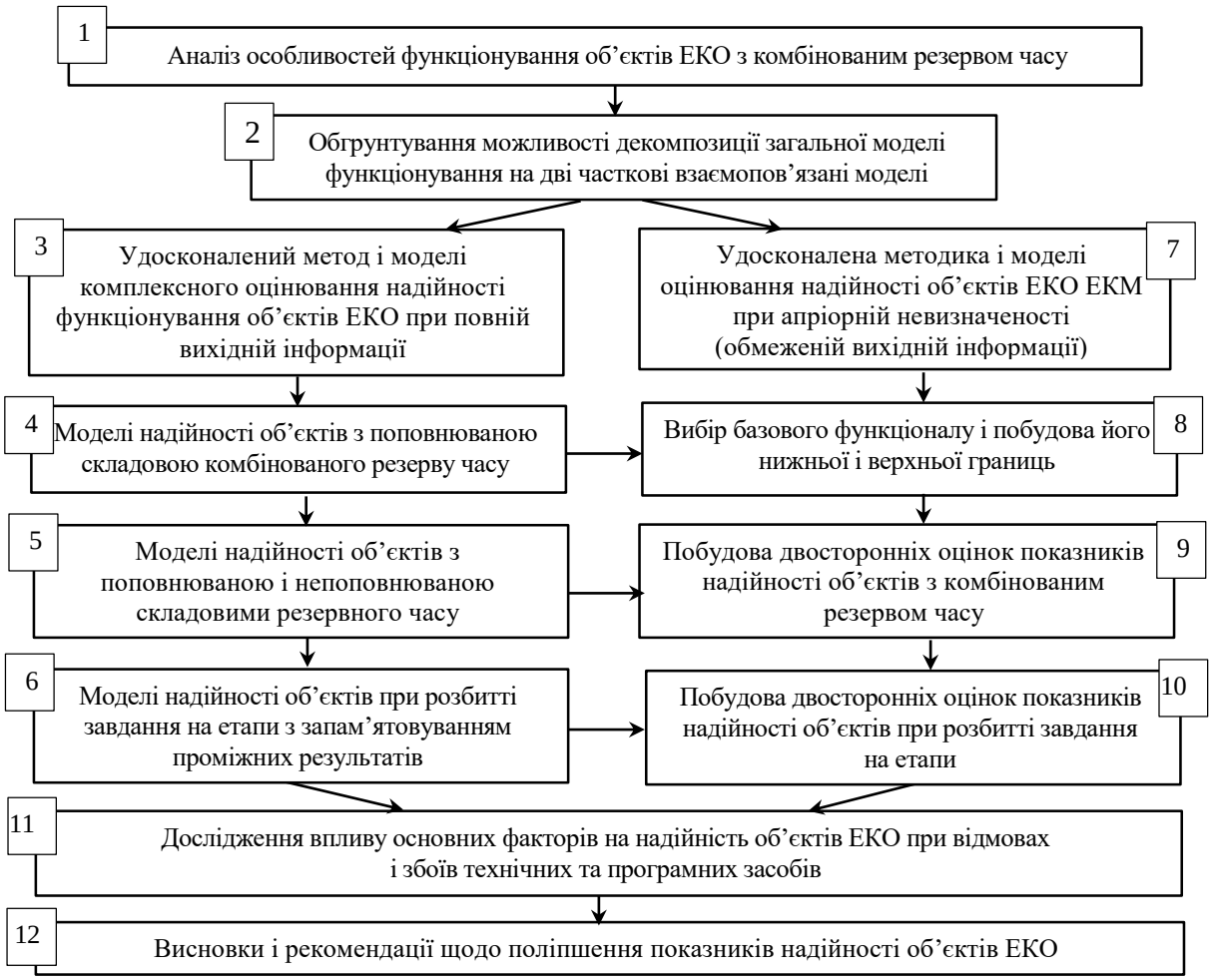

Рис.1. Структурна схема загальної методики комплексного оцінювання показників надійності об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу

Таким чином, використання комбінованого резерву часу, що містить поповнювану $t_д$ і не поповнювану t_p складові, забезпечує розрідження вихідного потоку відмов системи ОЧ на кожному етапі перевірки часових обмежень: на першому етапі – в результаті виконання умови $t_в \leq t_д$, на другому етапі – при виконанні умови $T_{нп}(t_з) > t_p$. Ефект розрідження відмов призводить до поліпшення всіх показників надійності функціонування системи ОЧ і проявляється тим сильніше, чим

більше виділяється та використовується резервного часу (t_∂, t_p).

На другому етапі загальної методики (рис. 1) проводиться обгрунтування необхідності та можливості декомпозиції загальної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі: перша – модель надійності об'єкта з поповнюваною складовою t_∂ загального резерву часу, результат дослідження якої використовується у другій математичній моделі, що описує функціонування системи з непоповнюваною складовою t_p з урахуванням вибраного варіанту взаємодії між складовими t_∂ і t_p резервного часу, що забезпечує синтез часткових результатів дослідження вказаних вище моделей та отримання загального розв'язання сформульованого наукового завдання.

Такий підхід дозволяє спростити процес отримання загального розв'язання задачі та дає можливість побудувати сукупність нових моделей надійності з урахуванням низки факторів, сумісно впливаючих на функціонування досліджуваної системи.

На наступних етапах методики (етапи 3−10 рис. 1) здійснюється розробка науково-методичного апарату з метою побудови моделей оцінювання надійності функціонування електронного комунікаційного обладнання при комплексному урахуванні різних факторів, найбільш суттєво впливаючих на досліджувані процеси.

При цьому розглянуті два випадки: перший – при повній і другий – при обмеженій вихідній інформації, у відповідності з якими були отримані відповідні наукові результати. В першому випадку (етапи 3−6) обгрунтовано удосконалений метод з розробкою та дослідженням двох взаємопов'язаних часткових математичних моделей функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання (з поповнюваною складовою t_∂ і непоповнюваною складовою t_p комбінованого резерву часу) і подальшим синтезом часткових результатів з метою отримання загального розв'язку задачі при повній вихідній інформації.

У другому випадку (етапи 7−10 рис. 1) запропоновано удосконалену методику побудови двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування об'єктів з комбінованим резервом часу в умовах апріорної невизначеності. В основі даної методики лежить вибір нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов і збоїв технічних та програмних засобів електронного комунікаційного обладнання і входить у формули для показників надійності, отримані при повній вихідній інформації, та побудові нижньої і верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності системи об'єкт-час шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

На заключних етапах методики (етапи 11 та 12) проводиться всебічний аналіз впливу різних факторів на показники надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах обмеженої надійності технічних та програмних засобів. Метою такого аналізу є кількісна оцінка рівня надійності електронного комунікаційного обладнання і ступінь її відповідності заданим вимогам, виявлення «слабких» місць та наукове обгрунтування рекомендацій щодо вибору шляхів та методів зменшення впливу обмеженої надійності (відмов та збоїв) об'єктів на функціонування ЕКО ЕКМ при використанні комбінованого резерву часу.

На основі запропонованої методики проведено комплексне оцінювання показників надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах відмов та збоїв технічних і програмних засобів [12]. Результати аналізу отриманих результатів оцінювання дозволяють сформулювати ряд висновків та рекомендацій щодо практичного використання результатів дослідження, які викладено нижче.

1. Ефективним методом поліпшення показників надійності функціонування електронного комунікаційного обладнання ЕКМ являється комбіноване часове резервування при сумісному використанні різних способів витрачення та поповнення часових резервів, які допомагають в багатьох випадках суттєво зменшити вплив негативних наслідків відмов та збоїв технічних та програмних засобів ЕКО на процес функціонування ЕКМ. Цей відносно мало досліджений до теперішнього часу метод отримав у [11] розвиток, що дозволяє зробити висновок про ефективності та доцільності його практичного використання при модернізації наявних та побудові перспективних ЕКМ.

Розрахунки показали, що в об'єктах ЕКО з комбінованим резервом часу і незнецінюючими відмовами ефективність використання часових резервів може бути суттєво підвищена при скороченні часу відновлення працездатності [12]. Цього можна досягти шляхом удосконалення засобів контролю працездатності та діагностування, а також підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу, що усувають відмови та збої обладнання і їх наслідки. При кількісному обгрунтуванні вибору значень параметрів (зокрема, інтенсивності відновлення працездатності, значень поповнюваної $t_д$ і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу та інше), визначаючих надійність функціонування ЕКО, доцільно використовувати розроблений в [11] науково-методичний апарат (моделі оцінки надійності – сукупність розрахункових формул для основних показників надійності систем з комбінованим резервом часу), заснований на комплексному підході до оцінки надійності. При цьому критерієм вибору може бути максимальна кількісна оцінка виграшу в надійності при тому чи іншому варіанті.

2. В об'єктах ЕКО з комбінованим часовим резервуванням, в яких переважають знецінюючі відмови і збої технічних та програмних засобів, визначальну роль грають великі втрати оперативного

(робочого) часу, обумовлені знеціненням попереднього корисного напрацювання, особливо при великих значеннях мінімального часу виконання завдання $t_з$. Проведений аналіз показав, що це може значно знизити ефективність часового резервування. В даних умовах доцільно приймати спеціальні міри щодо зменшення частки знецінюючих відмов і збоїв в загальному їх потоці та захисті об'єктів від вторинних наслідків відмов, які пов'язані з втручанням не тільки в структуру, але й в алгоритми функціонування ЕКО.

Іншим ефективним методом зменшення вторинних наслідків відмов і збоїв є розбиття завдання на декілька частин. Таке розбиття може проводитися за функціональним принципом, коли завдання природнім чином розпадається на самостійні частини, що мають закінчений сенс і називаються етапами. Мінімальний час виконання кожного етапу може бути різним. При невеликій кількості етапів або великих відмінностях в мінімальному часі їх виконання розбиття може проводитись і з відступом від функціонального принципу на етапи з однаковим мінімальним часом виконання. При такому розбитті повинно виконуватися основна вимога: відмова, яка виникла при виконанні чергового етапу, не повинна знецінювати напрацювання попередніх етапів.

Кількісний аналіз надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу з урахуванням розбиття виконуваного завдання на етапи дозволяє зробити висновок, що показники надійності таких об'єктів суттєво залежать від кількості етапів n завдання. Якщо розбиття на етапи викликає незначне збільшення тривалості завдання, яким можна знехтувати, то будь-яке збільшення n доцільне, так як суттєво зменшує сумарне знецінене напрацювання. Якщо при розбитті завдання на етапи витрачається певний час, яким знехтувати неможна, то для цього випадку в [12] отримані розрахункові співвідношення для визначення оптимального числа етапів завдання n_0 і середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_з, n_0)$ при оптимальному розбитті, які можуть найти практичне використання в інженерних розрахунках.

3. Проведене дослідження показало достатньо високу ефективність використання комбінованого часового резервування для поліпшення показників надійності об'єктів ЕКО при обраному способі взаємодії поповнюваної $t_д$ і непоповнюваної t_p складових резерву часу. Одночасно враховуючи обидві складові, при правильному виборі співвідношень між ними в таких системах ОЧ вдається довести значення показників надійності до необхідного рівня при порівняно невеликих кратностях часового резервування без застосування інших методів підвищення надійності. Однак, як і при інших видах надлишковості, поліпшення надійності функціонування не проходить даремно: може зменшуватися реальна продуктивність системи, ускладнюватися алгоритми функціонування, пред'являтися підвищені вимоги до ремонтного персоналу і всієї системи обслуговування.

Тому при модернізації наявних і створенні перспективних ЕКМ доцільно використовувати не тільки різні способи часового резервування, але й інші методи підвищення надійності, зокрема, структурне і інформаційне резервування [13]. Аналіз довів [12], що при виборі найбільш ефективного методу замість часового резервування або разом з ним доцільно використовувати так звані еквіваленти. Використання еквівалентів допомагає зіставити витрати (зокрема й і грошові), для досягнення того самого ефекту, та обирати один з них, а можливо, і комбінований метод підвищення надійності.

Висновки

Запропонована методика комплексного оцінювання надійності ЕКО з комбінованим часовим резервуванням дозволяє здійснювати аналіз впливу різних факторів на показники надійності обладнання. Аналіз результатів дослідження проведений на основі розробленої методики показав доцільність використання комбінованого часового резервування для зменшення негативного впливу відмов та збоїв без значного ускладнення обладнання.

Література

1. 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)/ (дата звернення: 10.01.2025).

2. Сенів М. 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.

3. 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.

4. 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://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132.

5. 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.

6. 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.

7. Chedia N. Study of the Telecommunication Networks Performance and Reliability Indicators / N. Chedia, M. Chkhartishvili [Electronic resource] // Wseas transactions on systems and control. – 2023. – Vol. 18. – P. 204 – 217. – Mode of access: 10.37394/23203.2023.18.21.

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

9. Креденцер Б.П. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія / Б.П. Креденцер // Київ: Фенікс, 2015. 314 с.

10. Іщеряков С.М. Функціональна стійкість інформаційних мереж за наявності обмеженої апріорної інформації про надійність [Електронний ресурс] / Іщеряков С.М., Прокопов С.В., Каргаполов Ю.В., Березовська Ю.В. // Зв'язок. 2020. №6. С. 42 – 46. – Режим доступу: 10.31673/2412-9070.2020.069966.

11. Тихонов М.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.

12. Тихонов М.В. Комплексна оцінка показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання [Електронний ресурс] / Тихонов М.В. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. – 2024. – Том 35 (74). – № 1. С.45 – 50. – Режим доступу: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07.

13. Могилевич Д.І. Модель надійності систем короткочасної дії з перериванням обслуговування [Електронний ресурс] / Могилевич Д.І., Креденцер Б.П., Кононова І.В., Могилевич В.Д. // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2022. – № 2 (02). – С. 250 – 264. – Режим доступу: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2021-02-02-18.

References

1. 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)/ (data zvernennya: 10.01.2025).

2. Seniv M. Zasobi rozrahunku pokaznikiv nadijnosti programnogo zabezpechennya na pidstavi modeli z urahuvannyam nedoskonalogo vidlagodzhennya [Elektronnij resurs] / M. Seniv, O. Royik // Naukovij visnik NLTU Ukrayini. – 2021. – T. 31. – № 6. – S. 87–91. – Rezhim dostupu: DOI:10.36930/40310613.

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

14. 4. Mogilevich D.I. Modeli nadijnosti ob'yektiv telekomunikacijnogo obladnannya z neznecinenimi abo povnistyu znecinenimi vidmovami programnih zasobiv [Elektronnij resurs] / D.I. Mogilevich, V.V. Sinko // Information Technology and Security. 2022 Vol. 10. – C. 50 – 59. – Rezhim dostupu: https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132.

5. 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.

6. Raskin L.G. Dekompozicijnij metod virishennya zavdan analizu markivskih sistem visokoyi rozmirnosti [Elektronnij resurs] / Raskin L.G., Sira O.V., Korsun R.O. // Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku. – 2020. – T. 2 (60). – S. 90 – 94. – Rezhim dostupu: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.090.

7. Chedia N. Study of the Telecommunication Networks Performance and Reliability Indicators / N. Chedia, M. Chkhartishvili [Electronic resource] // Wseas transactions on systems and control. – 2023. – Vol. 18. – R. 204 – 217. – Mode of access: 10.37394/23203.2023.18.21.

8. Knyazyeva N. Ocinka strukturnoyi nadijnosti telekomunikacijnih merezh neviznachenoyi topologiyi na osnovi imitacijnogo modelyuvannya [Elektronnij resurs] / N. Knyazyeva, O. Nyenov // Visnik Universitetu "Ukrayina" Seriya Informatika, obchislyuvalna tehnika ta kibernetika. – 2021. – № 2(23). – Rezhim dostupu: 10.36994/2707-4110-2019-2-23-18.

9. Kredencer B.P. Ocinka nadijnosti rezervovanih sistem pri obmezhenij vihidnij informaciyi: monografiya / B.P. Kredencer // Kiyiv: Feniks, 2015. 314 s.

10. Isheryakov S.M. Funkcionalna stijkist informacijnih merezh za nayavnosti obmezhenoyi apriornoyi informaciyi pro nadijnist [Elektronnij resurs] / Isheryakov S.M., Prokopov S.V., Kargapolov Yu.V., Berezovska Yu.V. // Zv'yazok. 2020. №6. S. 42 – 46. – Rezhim dostupu: 10.31673/2412-9070.2020.069966.

11. Tihonov M.V. Udoskonalena metodika pobudovi dvostoronnih ocinok pokaznikiv nadijnosti funkcionuvannya komunikacijnogo obladnannya merezh zv'yazku [Elektronnij resurs] / M.V. Tihonov, I.V. Kononova // Vcheni zapiski TNU imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki. – 2025. – Tom 36 (75) – № 1. – S. 27 – 42. – Rezhim dostupu: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/01.

12. Tihonov M.V. Kompleksna ocinka pokaznikiv nadijnosti ob'yektiv elektronnogo komunikacijnogo obladnannya [Elektronnij resurs] / Tihonov M.V. // Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo Seriya: Tehnichni nauki. – 2024. – Tom 35 (74). – № 1. S.45 – 50. – Rezhim dostupu: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07.

13. Mogilevich D.I. Model nadijnosti sistem korotkochasnoyi diyi z pererivannyam obslugovuvannya [Elektronnij resurs] / Mogilevich D.I., Kredencer B.P., Kononova I.V., Mogilevich V.D. // Infokomunikacijni ta komp'yuterni tehnologiyi. – 2022. – № 2 (02). – S. 250 – 264. – Rezhim dostupu: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2021-02-02-18.